

# ANÁLISE DO EFEITO DA DESAGREGAÇÃO DE DEPARTAMENTOS EM ARRANJOS FÍSICOS SUJEITOS A AMBIENTE DE PROGRAMAÇÃO DE TAREFAS COM FLEXIBILIDADE DE SEQUÊNCIA

**José Hamilton Chaves Gorgulho Júnior**  
Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI)  
Av. BPS, 1303, CEP: 37.500-903, Itajubá - MG, Brasil.  
gorgulho@unifei.edu.br

**Eduardo Vila Gonçalves Filho**  
Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo (EESC-USP)  
Av. Trabalhador São Carlense, 400, Centro, CEP: 13566-590, São Carlos - SP, Brasil.  
evila@sc.usp.br

## RESUMO

Este artigo analisa o efeito da divisão de departamentos na distância total percorrida pelas peças em arranjos físicos funcionais, parcialmente distribuídos, aleatoriamente distribuídos e maximamente distribuídos. As análises foram realizadas por meio do roteamento de 30 diferentes conjuntos de 150 peças em 202 diferentes arranjos físicos. As simulações computacionais levam em consideração duas situações distintas com relação a sequência de operações das peças: rígida e flexível (baseada em diagramas de precedência). Os resultados mostram que a desagregação completa dos departamentos é altamente vantajosa. Essa conclusão é diferente das obtidas em outros estudos, que não levaram em consideração a flexibilidade de sequenciamento de operações e o uso de um sistema de alocação que tirasse proveito dessa característica.

**PALAVRAS CHAVE.** Arranjos físicos, desempenho, simulação.

**SIM**

## ABSTRACT

This article analyzes the effect of departments division in total distance traveled by parts in the layouts functional, partially distributed, randomly distributed and maximally distributed. Analyses were performed by routing 30 different sets of 150 parts in 202 different arrangements. The computer simulations took into account two different situations with respect to the operations sequence of parts: rigid and flexible (based on diagrams of precedence). The results show that the complete breakdown of the departments is beneficial. This conclusion is different from those obtained by other studies, which did not take into account the flexibility of sequencing operations and the use of an allocation system that took advantage of that feature.

**KEYWORDS.** Layouts. Performance. Simulation.

**SIM**

## 1. Introdução

Desde a revolução industrial, no século XVIII, os arranjos físicos adotados pelas empresas de manufatura passam por modificações para adaptarem-se às necessidades de cada mercado em cada época. Os arranjos físicos considerados clássicos, segundo Slack *et al.* (1996) são: posicional, por processo (ou funcional), por produto (ou em linha) e celular. Benjaafar, Heragu e Irani (2002) mostram que as tendências de alguns setores da indústria sugerem que essas configurações clássicas não reúnem as características necessárias para atender aos empreendimentos multi-produtos e que é necessária uma nova geração de arranjos físicos que devem ser flexíveis, modulares e de fácil reconfiguração.

Assim, novas distribuições foram propostas, podendo-se citar como exemplo o arranjo físico distribuído (Montreuil e Venkatadri, 1991), o arranjo físico fractal (Venkatadri, Rardin e Montreuil, 1997) e o arranjo físico modular (Irani e Huang, 2000). Dentre esses, este trabalho usa o arranjo físico distribuído, que pode ser de dois tipos: parcialmente distribuído e maximamente distribuído. O objetivo desses arranjos físicos é garantir a proximidade entre estações de trabalho de diferentes processos para que rotas mais eficientes possam ser criadas pelo sistema de planejamento e controle da manufatura.

O arranjo físico parcialmente distribuído consiste em dividir os departamentos em departamentos menores, mas que ainda formam um conjunto de máquinas de mesma função. No arranjo físico maximamente distribuído procura-se espalhar todas as máquinas, de modo que não existam mais departamentos.

Na Figura 1 pode-se comparar dois arranjos físicos que possuem as mesmas máquinas. O da esquerda é maximamente distribuído e o da direita funcional. A parte inteira dos números indicam os processos (torneamento, furação, fresamento etc.) e a parte decimal representa o número da máquina nesse processo.

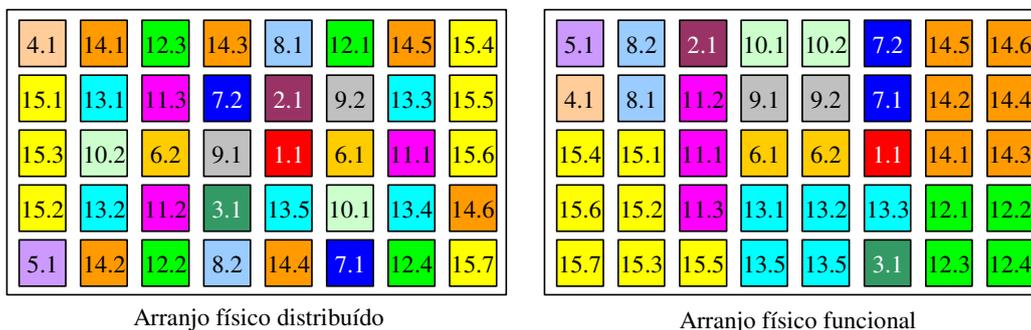


Figura 1 - Arranjos físicos distribuído e funcional (Montreuil e Venkatadri, 1991)

A questão que surge é: realmente vale o esforço de espalhar as máquinas? Trabalhos como os de Benjaafar e Sheikhzadeh (2000) e Lahmar e Benjaafar (2001, 2002a, 2002b, e 2005) afirmam que a desagregação completa dos departamentos não se justifica, pois a maior parte dos benefícios é obtida quando os departamentos são divididos em dois. Porém, os resultados deste trabalho indicam outra direção.

## 2. Metodologia

O procedimento consiste de três etapas: geração de arranjos físicos, geração de conjuntos de peças e simulação do roteamento dos conjuntos de peças nos arranjos físicos. A comparação de desempenho entre os arranjos físicos baseou-se na distância total percorrida pelas peças no chão de fábrica e no tempo total de atravessamento das mesmas. Cada uma dessas etapas será apresentada a seguir.

### 2.1 Geração de arranjos físicos

Foram criados 202 diferentes arranjos físicos contendo 36 máquinas divididas igualmente em 6 processos (6x6). Esse conjunto é formado por 50 arranjos físicos funcionais, 50

arranjos físicos parcialmente distribuídos (com cada departamento dividido em 2), 50 arranjos físicos parcialmente distribuídos (com cada departamento dividido por 3), 50 arranjos físicos aleatoriamente distribuídos (equivalente a dizer que cada departamento foi dividido por 6), 1 arranjo físico maximamente distribuído pelo algoritmo ALVO e 1 arranjo físico maximamente distribuído por um algoritmo genético. O número de máquinas e processos é o mesmo adotado por Benjaafar e Sheikhzadeh (2000) e Lahmar e Benjaafar (2001, 2002a, 2002b e 2005), permitindo comparar os resultados.

Os arranjos físicos foram criados automaticamente por um programa elaborado em Visual Basic 6. Para os arranjos físicos funcionais, parcialmente distribuídos e aleatoriamente distribuídos o procedimento foi baseado na curva de preenchimento espacial de Peano (Sagan, 1991). Pela Figura 2 percebe-se como essa curva percorre o arranjo físico e auxilia na distribuição das máquinas (no caso da figura tem-se um arranjo físico funcional).

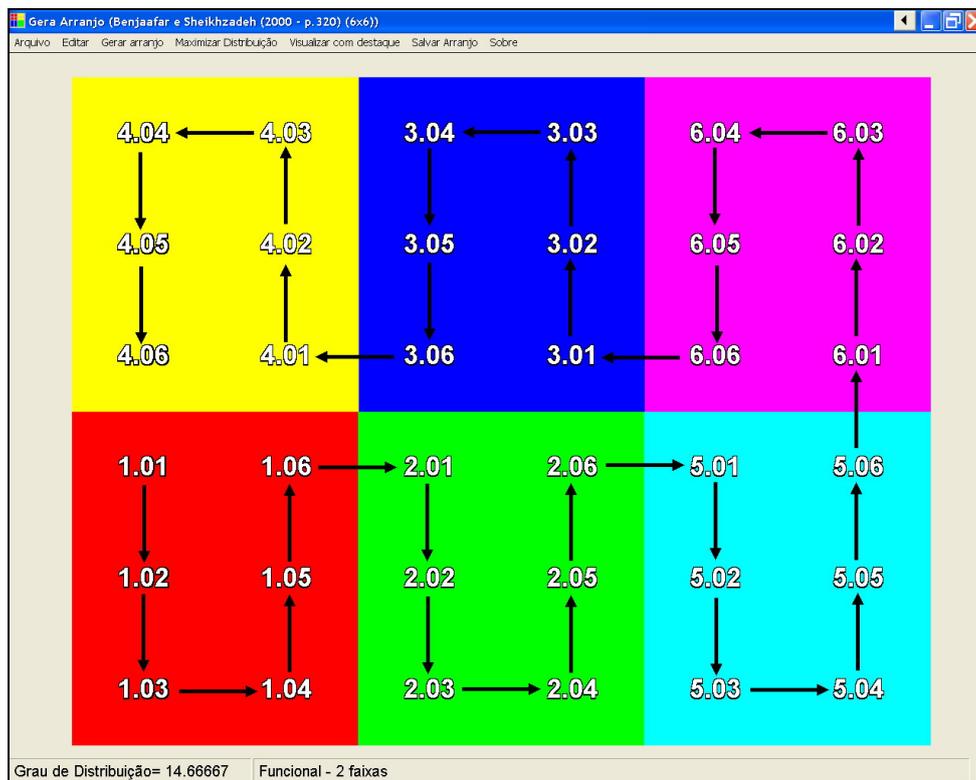


Figura 2 – Exemplo de arranjo físico funcional com a curva de Peano

A Figura 3 possui, no lado esquerdo, um exemplo onde cada departamento foi dividido em dois. Do lado direito os departamentos foram divididos em 3. Nota-se pela figura da direita que, devido à aleatoriedade com que as máquinas são atribuídas, podem ser formados departamentos maiores que os especificados. É devido a esse fato que cada grupo de arranjos físicos é composto por 50 elementos, permitindo que, na média, esses departamentos maiores não tenham grande influência nas simulações e análises.

O arranjo físico maximamente distribuído é uma distribuição mais complexa de ser obtida. Gorgulho Júnior e Gonçalves Filho (2005) propuseram um algoritmo, denominado ALVO, para a criação rápida deste tipo de arranjo físico, que não necessita de recursos de programação linear, como na proposta de Montreuil *et al.* (1993). Para poder avaliar o desempenho do algoritmo ALVO os autores elaboraram um algoritmo genético (AG) com o objetivo de maximizar a distribuição das máquinas no arranjo físico.

Devido a sua forma heurística o ALVO gera sempre o mesmo arranjo físico quando os mesmos dados de entrada são utilizados e, devido a isso, há apenas um arranjo físico elaborado com esse algoritmo neste estudo.

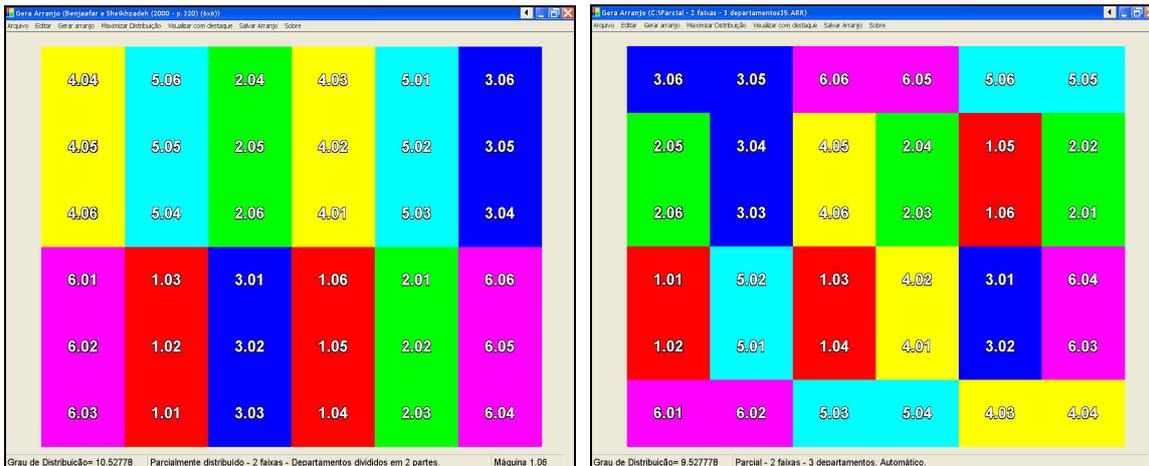


Figura 3 – Arranjos físicos parcialmente distribuídos

No caso do algoritmo genético, devido aos fatores aleatórios inerentes ao processo, cada execução gera uma distribuição ótima final diferente. O arranjo físico selecionado para análise neste trabalho foi o que obteve o melhor grau de distribuição de máquinas após várias execuções do algoritmo genético. No entanto deve ficar claro que, mesmo assim, não há como garantir que o arranjo físico selecionado seja, realmente, o mais distribuído possível. Na Figura 4 têm-se os arranjos físicos obtidos pelos algoritmos ALVO e genético.

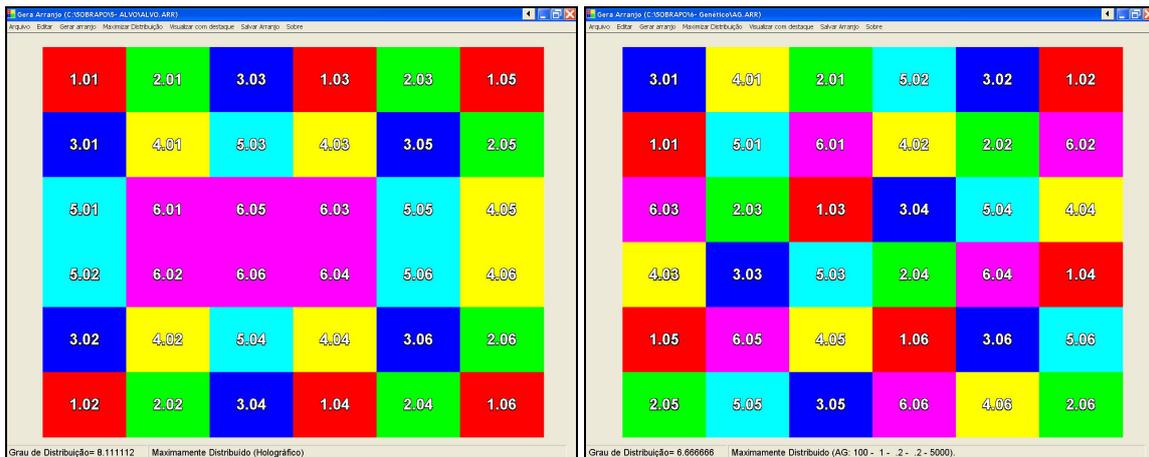


Figura 4 – Arranjos físicos maximamente distribuídos (ALVO à esquerda)

Observa-se que o algoritmo ALVO possui uma forte limitação quando o número de máquinas é igual em todos os departamentos, fazendo com que um grande departamento seja formado no centro do arranjo físico. Maiores detalhes sobre a geração automática dos arranjos físicos podem ser obtidos em Gorgulho Júnior (2007).

## 2.2 Geração de conjuntos de peças

Foram gerados automaticamente 30 conjuntos com 150 peças cada um, por um programa elaborado em Visual Basic 6. Cada peça tem de 3 a 6 operações selecionadas aleatoriamente entre os 6 departamentos disponíveis nos arranjos físicos. Cada operação tem um tempo de duração selecionado aleatoriamente entre 10 e 100 unidades de tempo.

Para que as peças tivessem flexibilidade na sequência de processamento a ordem de suas operações foram definidas por relações de precedência, como sugerido por Hutchinson e Pflughoeft (1994), Borenstein (2000), Sarker e Li (2001), Rohde e Borenstein (2004) e Groover (2011).

Foram pré-definidos alguns modelos de relações de precedência para cada número de operações. No momento de criação das peças um desses modelos é selecionado aleatoriamente. Para peças com 3 operações apenas um modelo foi criado, que permite 6 diferentes sequências (Figura 5).



Figura 5 – Modelo de precedência para peças com 3 operações

Como as três operações estão no mesmo nível, nenhuma possui precedência sobre as outras, ou seja, as operações podem ser executadas em qualquer ordem. As 6 sequências possíveis para este modelo são: ABC, ACB, BAC, BCA, CAB, CBA.

Para as peças com 4 e 5 operações foram elaboradas 3 estruturas de precedência. Já, para peças com 6 operações há 4 estruturas. A Figura 6 mostra graficamente as estruturas e o número de sequências que cada uma permite.

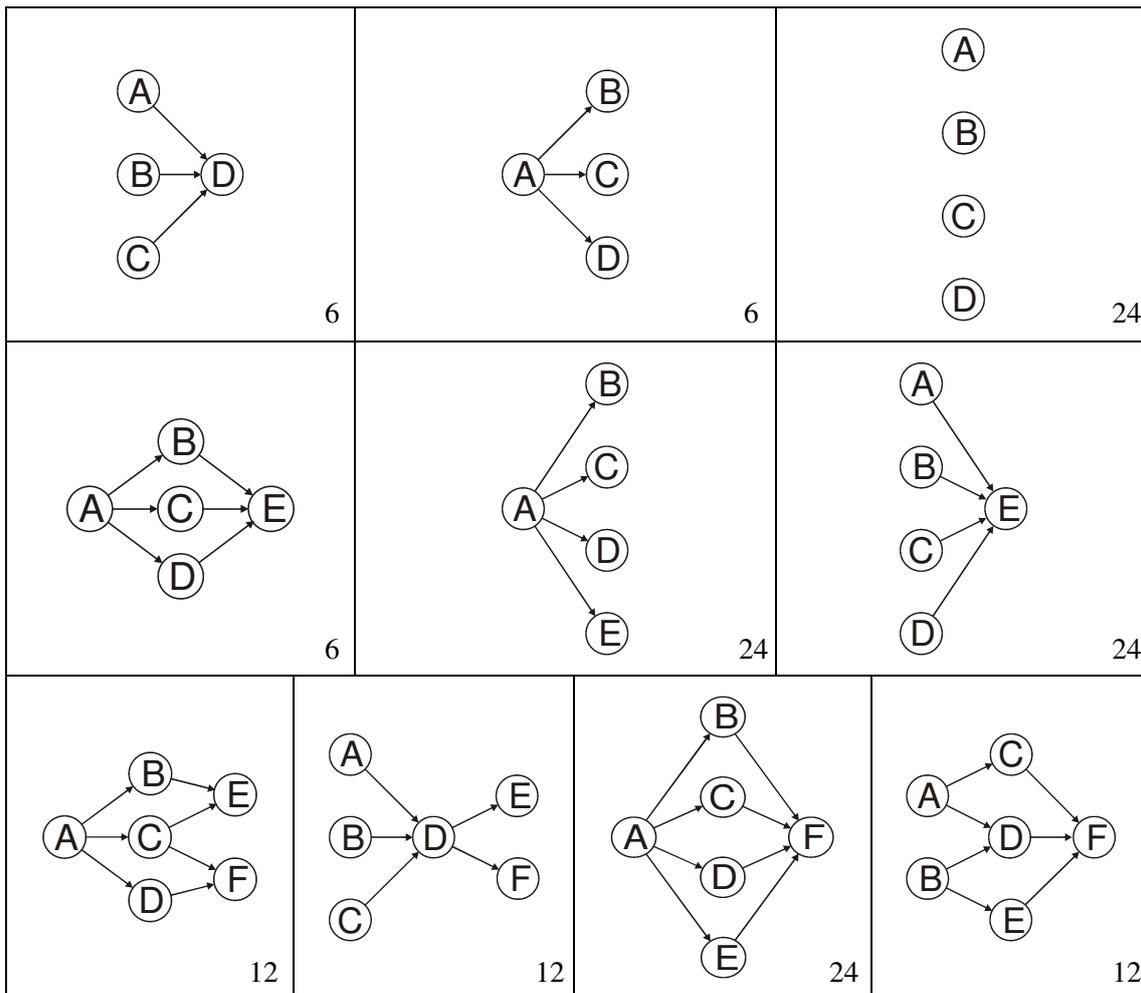


Figura 6 – Modelos de precedência para peças com 4, 5 e 6 operações

Pode-se observar o resultado logo após o procedimento de geração dos conjuntos de peças. A Figura 7 mostra a visualização da peça 99 do primeiro conjunto. Nessa visualização vêm-se os tempos atribuídos a cada operação (abaixo do círculo com o número do processo).

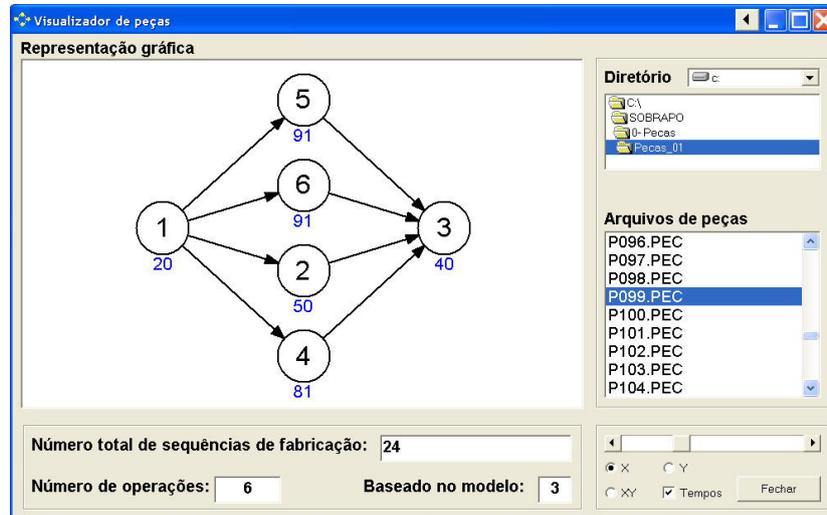


Figura 7 – Visualização de uma das peças de um dos conjuntos

As aleatoriedades do procedimento adotado permitiram criar, com rapidez, as 4500 peças diferentes (divididas nos 30 conjuntos) com flexibilidade de sequencia de processo. Detalhes podem ser obtidos em Gonçalves Filho e Gorgulho Júnior (2006) e Gorgulho Júnior (2007).

### 2.3 Simulação do roteamento

O roteamento dos conjuntos de peças nos grupos de arranjos físicos é realizado por outro programa escrito em Visual Basic 6. Como citado, foram realizados roteamentos rígido e flexível. No rígido apenas a primeira das possíveis sequências de cada peça é considerada. No flexível todas as sequências são analisadas e a melhor selecionada. Por melhor roteamento deve-se entender como sendo a rota com a menor distância percorrida pela peça no arranjo físico. Quando duas ou mais rotas tem a mesma distância mínima, adota-se como critério de desempate o tempo de conclusão da peça (tempo de atravessamento). Em outras palavras, o objetivo do roteamento é minimizar tanto o *makespan* (tempo total de trabalho) quanto o somatório das distâncias percorridas pelas peças (com prioridade a esta segunda, nesta pesquisa).

O processo de roteamento/alocação das operações nas máquinas é complexo. A alocação da primeira peça no modo rígido é a tarefa mais simples, pois nenhuma máquina está ocupada e a peça possui apenas uma sequencia. Mesmo com essa simplificação o procedimento analisa muitas possibilidades, pois a primeira operação possui 6 possíveis máquinas de partida. Para cada uma dessas máquinas deve-se verificar a distância para as 6 possíveis máquinas que executarão a segunda operação. O processo continua até a última operação para encontrar a rota com menor distância percorrida. Conforme as máquinas vão tendo operações alocadas é necessário observar qual opção permite que a peça fique pronta mais cedo (além de observar a distância percorrida). Pode-se, então, imaginar a quantidade de análises realizadas no caso do roteamento flexível, pois o processo se repetirá para cada uma das sequências (uma simulação que demorou quase 17 minutos no modo rígido levou quase 3 horas no flexível). Informações adicionais estão em Gorgulho Júnior e Gonçalves Filho (2007) e Gorgulho Junior (2007).

A Figura 8 traz, como exemplo do resultado do processo de roteamento/alocação, uma tela com o gráfico de Gantt do roteamento flexível do primeiro conjunto de peças no primeiro arranjo físico funcional. Esse gráfico, que mostra todas as peças, fornece apenas uma ideia da ocupação das máquinas, pois possui muitos dados e torna-se praticamente ilegível.

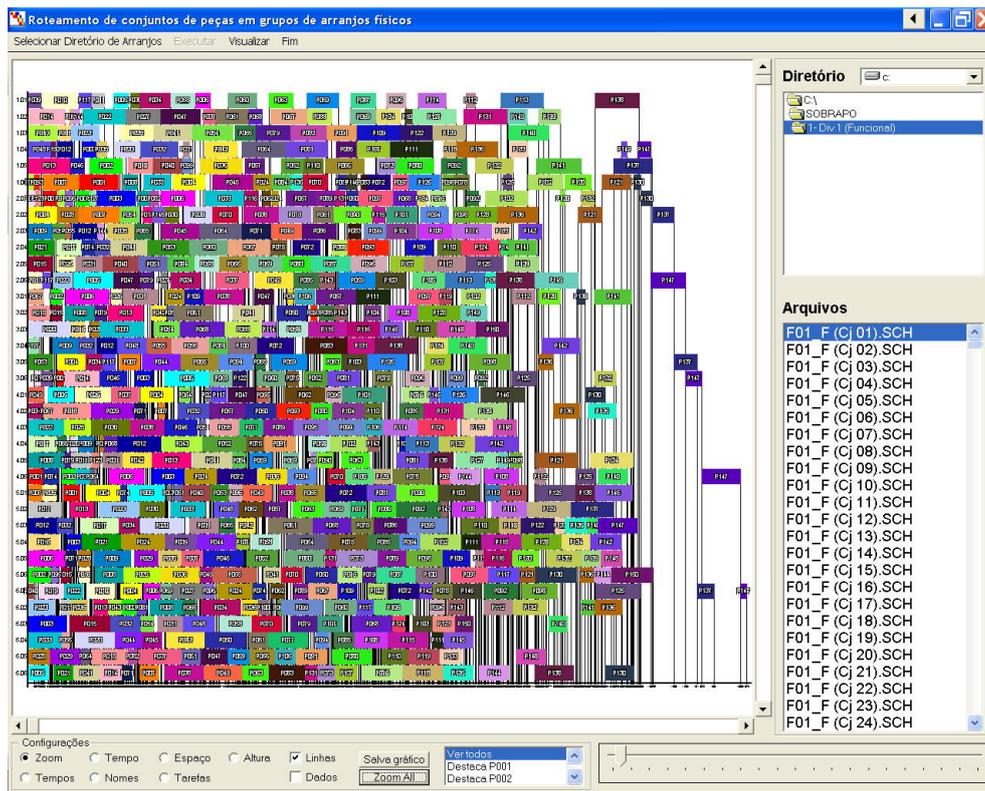


Figura 8 – Gráfico de Gantt com a alocação do primeiro conjunto de peças

O programa permite analisar a alocação de cada peça, destacando suas operações. Pode-se observar na Figura 9 a peça 99 do primeiro conjunto (que foi detalhada na Figura 7). Os dados de cada operação são colocados no topo da tela quando o *mouse* passa sobre a operação. Com esse recurso pode-se verificar que a sequencia adotada no procedimento de roteamento foi 1-6-4-2-5-3. Usando as letras do modelo de precedência essa sequencia corresponde a ACEDBF, indicando que não foi utilizada a primeira sequencia que seria ABCDEF.

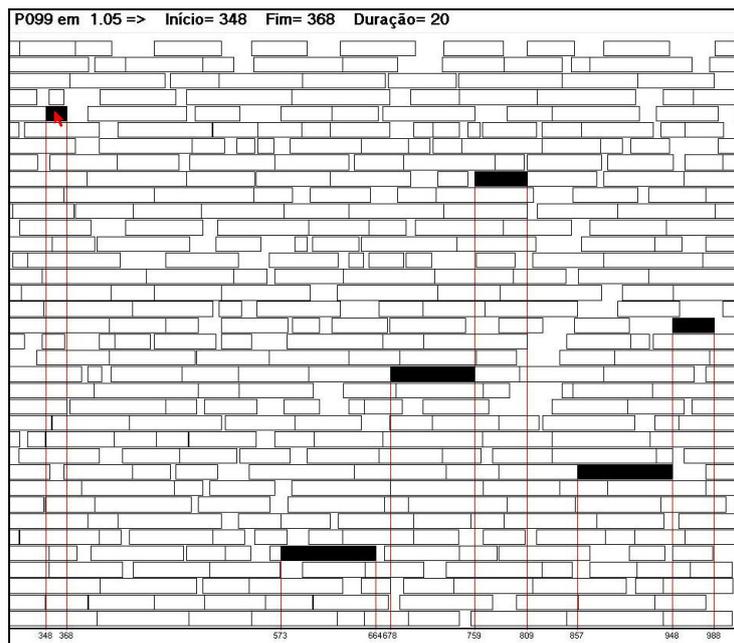


Figura 9 – Alocação da peça 99 do primeiro conjunto de peças

### 3. Simulações

Foram realizadas 12 simulações, sendo 6 no modo de roteamento rígido e 6 no flexível. Cada conjunto de 6 simulações é composto pelo roteamento dos 30 conjuntos de peças nos 202 arranjos físicos citados no início deste trabalho. Em cada simulação foram colhidos os valores de *makespan* e distância total percorrida pelas peças. Todos esses dados foram reunidos em quadros que, neste trabalho, por questão de espaço, mostram apenas parte dos valores das distâncias.

No Quadro 1 estão as distâncias percorridas no roteamento rígido enquanto que no Quadro 2 estão as do flexível. Na parte inferior dos quadros têm-se os valores médio, mínimo, máximo, amplitude e desvio padrão.

Notas-se que as colunas ALVO e AG apresentam números inteiros, diferente das demais. Isso se deve ao fato de existir apenas um arranjo físico gerado pelo algoritmo ALVO e um pelo algoritmo genético. Nas demais colunas há 50 diferentes arranjos físicos e os números são, portanto, valores médios.

Quadro 1 - Distâncias no roteamento rígido

	Funcional	Parcial (÷2)	Parcial (÷3)	Aleatório (÷6)	ALVO	AG
1	2067.28	1759.04	1677.22	1555.60	1355	1348
2	2086.98	1785.38	1692.56	1566.88	1421	1358
3	1974.78	1677.98	1581.96	1471.24	1295	1307
...	...	...	...	...	...	...
29	1971.96	1698.78	1614.02	1513.94	1348	1334
30	2048.30	1740.02	1650.16	1517.72	1353	1325
<b>Média</b>	<b>2020.14</b>	<b>1722.88</b>	<b>1634.84</b>	<b>1514.64</b>	<b>1357.33</b>	<b>1309.17</b>
<b>Mínimo</b>	1876.96	1612.28	1527.92	1420.68	1260	1201
<b>Máximo</b>	2136.90	1826.84	1743.56	1615.72	1509	1451
<b>Amplitude</b>	259.94	214.56	215.64	195.04	249	250
<b>Desvio Padrão</b>	63.39	53.36	52.20	49.11	56.84	60.26

Quadro 2 - Distâncias no roteamento flexível

	Funcional	Parcial (÷2)	Parcial (÷3)	Aleatório (÷6)	ALVO	AG
1	1790.56	1538.10	1474.96	1351.56	1274	1197
2	1850.34	1573.16	1513.96	1389.26	1248	1195
3	1765.18	1490.36	1426.92	1314.88	1198	1084
...	...	...	...	...	...	...
29	1742.44	1489.60	1432.36	1318.28	1195	1120
30	1794.32	1545.36	1467.12	1354.12	1240	1192
<b>Média</b>	<b>1777.96</b>	<b>1515.49</b>	<b>1449.57</b>	<b>1335.27</b>	<b>1245.00</b>	<b>1145.30</b>
<b>Mínimo</b>	1647.76	1389.22	1327.12	1218.14	1146	992
<b>Máximo</b>	1859.78	1580.72	1522.00	1397.74	1321	1220
<b>Amplitude</b>	212.02	191.50	194.88	179.60	175	228
<b>Desvio Padrão</b>	52.94	47.27	46.86	41.97	46.84	49.17

#### 4. Análise dos resultados

Conclui-se pelos valores médios dos Quadros 1 e 2 que, tanto no roteamento rígido quanto no flexível, há uma redução no somatório das distâncias percorridas pelas peças conforme os departamentos vão sendo desagregados. O Quadro 3 mostra a redução percentual das distâncias percorridas entre dois tipos de arranjo físico (tanto no roteamento rígido quanto no flexível).

Quadro 3 - Redução percentual das distâncias entre as configurações

	Do funcional para o ÷2	Do ÷2 para o ÷3	Do ÷3 para o Aleatório	Do aleatório para o ALVO	Do ALVO para o AG
<b>Rígido</b>	14.72%	5.11%	7.35%	10.39%	3.55%
<b>Flexível</b>	14.76%	4.35%	7.89%	6.76%	8.01%

Plotando esses valores em um gráfico de linhas fica visualmente evidente que a desagregação dos departamentos possui grande influência na redução das distâncias percorridas, como se pode ver na Figura 10. O comportamento obtido nos dois tipos de roteamento é similar, com clara vantagem do roteamento flexível.

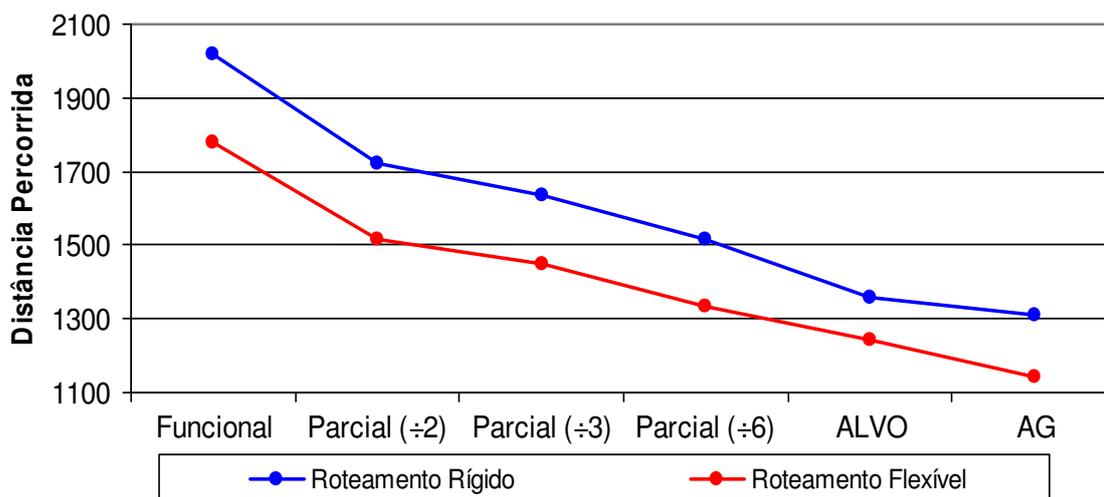


Figura 10 - Comparação das distâncias percorridas

Para uma melhor comparação entre todos os arranjos físicos os dados percentuais foram organizados na Tabela 1, para o roteamento rígido e na Tabela 2, para o roteamento flexível. Os valores que já constam no Quadro 3 estão destacados.

Tabela 1 - Diferença percentual entre distâncias no roteamento rígido

		Para o arranjo físico				
		Parcial (÷2)	Parcial (÷3)	Aleatório (÷6)	ALVO	AG
Do arranjo físico	<b>Funcional</b>	14.72	19.07	25.02	32.81	35.19
	<b>Parcial (÷2)</b>	-	5.11	12.09	21.22	24.01
	<b>Parcial (÷3)</b>	-	-	7.35	16.98	19.92
	<b>Parcial (÷6)</b>	-	-	-	10.39	13.57
	<b>ALVO</b>	-	-	-	-	3.55

Tabela 2 - Diferença percentual entre distâncias no roteamento flexível

		Para o arranjo físico				
		Parcial (÷2)	Parcial (÷3)	Aleatório (÷6)	ALVO	AG
Do arranjo físico	Funcional	14.76	18.47	24.90	29.98	35.58
	Parcial (÷2)	-	4.35	11.89	17.85	24.43
	Parcial (÷3)	-	-	7.89	14.11	20.99
	Parcial (÷6)	-	-	-	6.76	14.23
	ALVO	-	-	-	-	8.01

## 5. Comentários e conclusões

Benjaafar e Sheikhzadeh (2000) e Lahmar e Benjaafar (2001, 2002a, 2002b, e 2005) concluíram que a maior parte dos benefícios é obtida quando os departamentos são divididos em dois e que a desagregação completa dos departamentos não se justifica. Porém, os resultados obtidos nesta pesquisa, mostram que a desagregação completa traz grande benefício. Quais os motivos dessa diferença?

Esses autores realizaram simulações, também com dados gerados automaticamente, mas considerando que informações probabilísticas de demanda estavam disponíveis previamente para o projeto dos arranjos físicos. Isso, obviamente, vai contra a própria origem do arranjo físico maximamente distribuído, que foi imaginado para ambientes altamente dinâmicos, onde esse tipo de informação não está disponível. Segundo Baykasoglu (2003), a obtenção de informações futuras e o uso de probabilidades em um ambiente altamente volátil não se mostram como abordagens adequadas.

Soma-se a isso o fato desses trabalhos não considerarem a flexibilidade nos processos de fabricação das peças e, conseqüentemente, o não uso de um sistema de roteamento inteligente. Com isso não se consegue tirar o máximo proveito da distribuição das máquinas de modo que rotas mais eficientes possam ser definidas e adotadas.

Conclui-se, portanto, que a desagregação dos departamentos tem grande influência na redução das distâncias percorridas quando as peças possuem flexibilidade de sequenciamento de operações e o sistema de roteamento faz uso dessa característica. Essa conclusão alinha-se perfeitamente com a declaração de Montreuil *et al.* (1993) que afirmavam que o desempenho dos arranjos físicos distribuídos tem forte dependência do sistema de planejamento e controle da produção.

## 6. Sugestões para futuros trabalhos

O algoritmo ALVO mostra-se, pelo menos para o caso no qual os departamentos possuem o mesmo número de máquinas, uma limitação. Os resultados mostram que, mesmo com essa limitação, o arranjo físico gerado por ele consegue ser melhor que uma distribuição aleatória. A melhoria desse algoritmo, ou a elaboração de um novo, que trabalhe melhor com essa situação é uma direção a ser seguida, pois se aproximaria dos resultados obtidos por um algoritmo genético, mas sem o tempo consumido por ele.

Os resultados obtidos foram baseados em dados gerados automaticamente (como em quase todas as pesquisas relacionadas aos arranjos físicos distribuídos). O uso de dados reais pode mostrar o quão eficiente, ou não, a desagregação dos departamentos pode ser, quando o ambiente é altamente dinâmico e o projeto de um arranjo físico passa a ser um diferencial de competitividade.

Agradecemos à FAPEMIG pelo apoio financeiro, por meio do Edital 07/2009 (Grupos Emergentes de Pesquisa) na criação do NEAAD – Núcleo de Estudos de Auxílio à Decisão da UNIFEI (Universidade Federal de Itajubá).

## Referências

- Benjaafar, S. e Sheikhzadeh, M.** Design of flexible plant layouts. *IEE Transactions*, n.32, p.309-322, 2000.
- Baykasoglu, A.** Capability-based distributed layout approach for virtual manufacturing cells. *International Journal of Production Research*, v.41, n.11, p.2597-2618, 2003.
- Benjaafar, S., Heragu, S. S. e Irani, S. A.** Next generation factory layouts: research challenges and recent progress. *Interfaces*, v. 32, n. 6, p. 58-76, Nov-Dec, 2002. Disponível em: <<http://www.me.umn.edu/labs/ngfl/ngfl.pdf>>. Acesso em: 15 Abr. 2011.
- Borenstein, D.** A Direct Acyclic Graph Representation of Routing Manufacturing Flexibility. *European Journal of Operational Research*, n.127, p.78-93, 2000.
- Gonçalves Filho, E. V. e Gorgulho Júnior, J. H. C.** Uma solução computacional para geração automática de peças com flexibilidade de processo para simulação. GEPROS, Ano 1, número 3, PP.37-50, Ago, 2006.
- Gorgulho Júnior, J. H. C e Gonçalves Filho, E. V.** Análise do desempenho dos arranjos físicos distribuídos operando sob roteamento de peças com flexibilidade de seqüenciamento, *Revista Gestão Industrial*, V.3, n.1, 2007.
- Gorgulho Júnior, J. H. C.** Análise do desempenho dos arranjos físicos distribuídos em ambiente de roteamento de peças com flexibilidade de seqüência de fabricação. *Tese (Doutorado)*, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo (EESC-USP), 28 de Fev, 2007.
- Groover, M. P.** *Automação industrial e sistemas de manufatura*. 3ª Edição, Pearson Education, São Paulo, 2011.
- Hutchinson, G. K. e Pflughoeft, K. A.** Flexible Process Plans: Their Value in Flexible Automation Systems. *International Journal of Production Research*, v.32, n.3, p.707-719, 1994.
- Irani, S. A. e Huang, H.** Custom design of facility layouts for multi-product facilities using layout modules, *IEEE Transactions. Robotics Automation*, v.16, p.259-267, 2000.
- Lahmar, M. e Benjaafar, S.** Design of dynamic distributed layouts. *INFORMS Fall Meeting, Session TC17 (Advances in Factory Layouts)*, Miami, Florida, Nov, 2001.
- Lahmar, M. e Benjaafar, S.** Design of dynamic distributed layouts. *Proceedings of the 11th Annual Industrial Engineering Research Conference (IERC)*, May 19-21, Orlando, Florida, 2002a.
- Lahmar, M. e Benjaafar, S.** Design of dynamic distributed layouts. *Working Paper*, Department of Mechanical Engineering, University of Minnesota, Minneapolis, MN, 2002b. Disponível em: <<http://www.me.umn.edu/labs/ngfl/distlayout.pdf>>. Acesso em: 06 Fev. 2011.
- Lahmar, M. e Benjaafar, S.** Design of distributed layouts. *IEE Transactions*, v.37, p.303-318, 2005.
- Montreuil, B. e Venkatadri, U.** Scattered layout of intelligent job shops operating in a volatile environments, *Proceedings of the International Conference on Computer Integrated Manufacturing*, Singapore, p.295-298, 1991.
- Monteuil, B., Lefrançois, P, Marcotte, S. e Venkatadri, U.** Layout for Chaos – Holographic Layout of Manufacturing Systems Operating in Highly Volatile Environments. Document de Travail 93-53, Faculté des Sciences de L'Administration, Université Laval, Québec, Canadá, 25 p, 1993.
- Rohde, L. R. e Borenstein, D.** Representação em Espaço de Estados para a Flexibilidade de Roteamento. *Gestão e Produção*, v.11, n.2, p.251-261, 2004. Disponível em: <[http://www.diaadiaeducacao.pr.gov.br/diaadia/diadia/arquivos/File/conteudo/veiculos\\_de\\_comunicacao/RGP/VOL11N2/A11V11N2.PDF](http://www.diaadiaeducacao.pr.gov.br/diaadia/diadia/arquivos/File/conteudo/veiculos_de_comunicacao/RGP/VOL11N2/A11V11N2.PDF)>. Acesso em: 28 Fev. 2011.
- Sagan, H.** *Space-filling curves*. Universitext, Springer-Verlag, New York, 1991.
- Sarker, B. R.; Li, Z.** Job Routing and Operations Scheduling: a Network-Based Virtual Cell



Formation Approach. *Journal of Operational Research Society*, n.52, p.673-681, 2001.

**Slack, N., Chambers, S., Harland, C., Harrison, A. e Johnston, R.** *Administração da produção*, Editora Atlas S.A., São Paulo, 1996.

**Venkatadri, U; Rardin, R. L. e Montreuil, B.** (1997), A design methodology for the fractal layout organization, *IEE Transactions*, v.29, n.10, p.911-924, 1997.