

Nova abordagem na geração de arranjo físico maximamente distribuído

José Hamilton Chaves Gorgulho Júnior (UNIFEI) gorgulhojunior@ig.com.br

Eduardo Vila Gonçalves Filho (EESC-USP) evila@sc.usp.br

Resumo

Este trabalho apresenta uma metodologia desenvolvida para gerar arranjos físicos maximamente distribuídos. Inicialmente apresentam-se as características de um ambiente de manufatura turbulento e os arranjos físicos propostos para atuar nessa condição. Em seguida expõem o problema a ser analisado com simulação. O item seguinte trata especificamente do arranjo físico distribuído e do cálculo do grau de distribuição. Após a apresentação da metodologia proposta são mostrados os resultados obtidos por meio de uma implementação computacional. No final são apresentados os comentários sobre esses resultados.

Palavras-chave: Arranjo Físico Maximamente Distribuído; Simulação; Layout.

1. Introdução

As indústrias de manufatura de classe mundial estão expostas a um complexo ambiente onde as mudanças nos processos e produtos ocorrem com grande frequência. Esse ambiente é citado por Rheault, Drolet e Abdunour (1995) como volátil, turbulento ou altamente dinâmico. Esses autores compilaram as diversas características apresentadas por esse ambiente e que foram citadas por outros pesquisadores:

- Alta variabilidade na demanda e no tamanho dos lotes de produção;
- Alta variabilidade nos tempos de processamento e nos tempos de preparação;
- Demanda parcialmente ou totalmente estocástica;
- Frequentes mudanças no mix de produtos;
- Variabilidade nas seqüências de produção;
- Forte competição.

Em ambientes com essas características os arranjos físicos clássicos (por produto, por processo, posicional e celular) não atingem um nível de desempenho satisfatório (BENJAAFAR, HERAGU e IRANI, 2002). Sendo assim novos arranjos físicos foram propostos para operarem nas condições citadas, podendo-se citar o *arranjo distribuído* sugerido por Montreuil e Venkatadri (1991), o *arranjo fractal* apresentado por Venkatadri, Rardin e Montreuil (1997) e o *arranjo modular* introduzido por Irani e Huang (2000).

O arranjo físico distribuído (*distributed layout*) também foi denominado de espalhado (*scattered layout*) e disperso (*dispersed layout*). Caracteriza-se por espalhar as máquinas pelo chão de fábrica de modo a aproximar diferentes tipos de máquinas, ou seja, o objetivo desse arranjo físico é garantir a proximidade de qualquer estação de trabalho de qualquer processo às estações de trabalho de outros processos para que rotas mais eficientes possam ser criadas em tempo real pelo sistema computadorizado de planejamento e controle da manufatura. A Figura 1 compara um arranjo funcional com um arranjo distribuído.

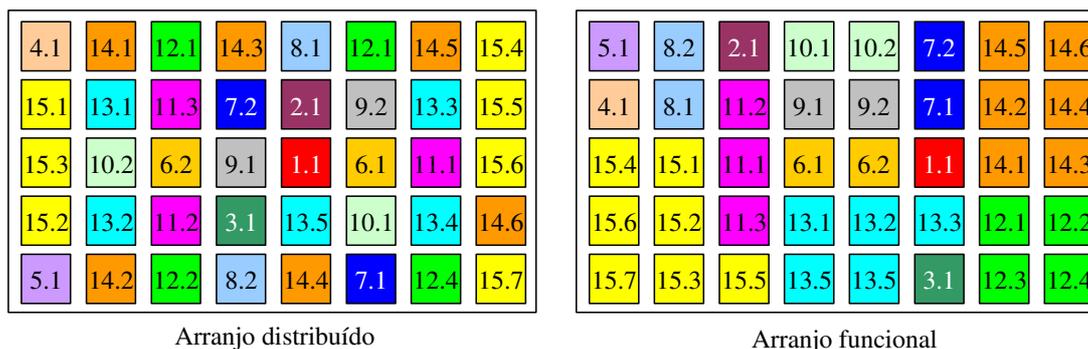


Figura 1 – Arranjos físicos distribuído e funcional (adaptado de MONTREUIL e VENKATADRI, 1991)

Montreuil et al. (1993) comparam o desempenho entre arranjos físicos aleatoriamente distribuídos com arranjos distribuídos por um critério de utilização de máquinas. Benjaafar e Sheikhzadeh (2000) e Lahmar e Benjaafar (2005) realizam comparações entre arranjos funcionais, aleatoriamente distribuídos, parcialmente distribuídos e maximamente distribuídos. Esses trabalhos apontam para uma grande superioridade do arranjo parcialmente distribuído sobre o funcional e uma pequena vantagem do arranjo maximamente distribuído sobre o parcialmente distribuído. Deve-se ressaltar que nesses trabalhos e também nas demais pesquisas relacionadas com o arranjo distribuído todos os resultados foram obtidos por meio de simulações com dados gerados pelos autores. A única exceção encontrada é o trabalho de Baykasoglu (2003) que usou dados reais, mas sem implementar o arranjo físico projetado.

2. Descrição do problema

Nenhum dos trabalhos relacionados com o arranjo distribuído leva em consideração peças com flexibilidade de processo. Isso permite levantar a hipótese de que o arranjo maximamente distribuído possa ter um desempenho sensivelmente superior ao parcialmente distribuído se o sistema de programação (*scheduling*) tiver opções de seqüenciamento das operações.

Para trabalhar sobre essa hipótese, além de peças com flexibilidade de processo, é necessário que o sistema de simulação tenha disponível os arranjos físicos a serem comparados. Dentre esses arranjos será discutido no próximo item o arranjo distribuído.

3. Abordagens para o projeto de arranjos físicos distribuídos

O arranjo distribuído foi proposto pelo pesquisador Benoit Montreuil e seus colaboradores em trabalhos como Montreuil e Venkatadri (1991), Montreuil, Venkatadri e Lefrançois (1991) e Montreuil et al. (1993). Sua abordagem consiste em maximizar a distância entre máquinas de um mesmo tipo e minimizar a distância entre máquinas de tipos diferentes. Isto é realizado por um algoritmo, denominado *Target* que será detalhado no item 5. Um dado importante é que esses autores usaram dados como taxa de utilização e tempos de processamento dos lotes para calcular a probabilidade de movimentação de peças entre as máquinas.

Outra abordagem foi apresentada pelo pesquisador Saifallah Benjaafar nos trabalhos: Benjaafar (1995), Benjaafar e Sheikhzadeh (1996, 2000) e Lahmar e Benjaafar (2001, 2002a, 2002b, 2005). Esses trabalhos foram baseados em probabilidades para definir possíveis cenários e níveis de demanda, assumindo que as informações de demanda de cada período estão disponíveis no estágio inicial do projeto. Além disso, o algoritmo proposto necessita usar uma solução comercial para a resolução de problemas de programação linear (CPLEX).

Porém o projeto de um arranjo físico baseado no uso de probabilidades e em informações futuras sobre a produção é condenado por Baykasoglu (2003). A imprevisibilidade é uma das principais características de um ambiente altamente volátil tornando essas abordagens inadequadas e pouco confiáveis.

4. Grau de distribuição

Para avaliar a distribuição das máquinas no arranjo Benjaafar e Sheikhzadeh (2000) usaram um valor denominado *grau de distribuição*. Usaram uma abordagem similar à proposta por Montreuil et al. (1993), porém, ignorando informações sobre fluxo de material. Esse cálculo, apresentado pelas equações (1) e (2), mede a distância entre cada máquina de um tipo e as máquinas dos demais tipos. Quanto mais espalhadas estão as máquinas, menor será o valor obtido por essa função, ou seja, menor é a distância entre máquinas de processos diferentes.

$$\Phi = \sum_{j=1}^N \sum_{nj=1}^{Nj} \frac{\delta_{nj}}{N.Nj} \quad (1)$$

$$\delta_{nj} = \sum_{k \neq j}^N d_{n,jk}^* \quad (2)$$

Onde: $d_{n,jk}^*$: distância entre a n-ésima máquina do tipo j e a máquina do tipo k mais próxima.

nj: n-ésima máquina do tipo j.

Nj: número de máquinas do tipo j.

N: número de processos (departamentos ou tipos de máquina).

Para permitir comparações entre arranjos físicos esse cálculo foi adotado e implementado no programa que será apresentado no item 8.

5. Algoritmo TARGET

O algoritmo *Target* foi apresentado por Montreuil et al. (1993) e gera o arranjo distribuído em 2 fases. A primeira fase gera aleatoriamente uma posição para cada máquina de um mesmo tipo. Em seguida usa um procedimento heurístico para maximizar a distribuição das máquinas. Esse procedimento movimenta uma máquina de cada vez para posições adjacentes à posição atual (Norte, Sul, Leste e Oeste) e calcula o resultado de uma função objetivo a cada movimento em busca de uma posição que otimize a distribuição. Esse procedimento é realizado até que a função objetivo não obtenha nenhuma melhoria. Ao final dessa etapa cada máquina terá sua posição otimizada. Porém, como o procedimento é realizado para cada tipo de máquina separadamente, haverá posições com mais de uma máquina pré-alocada. A segunda fase do algoritmo é responsável por uma relação de compromisso para definir a posição final de cada máquina o mais próximo possível da posição ideal calculada na primeira fase. Essa relação de compromisso leva em consideração dados como taxa de utilização e tempos de processamento dos lotes.

6. Algoritmo ALVO

O algoritmo que será apresentado em seguida foi denominado ALVO devido a forma como aloca as máquinas: calcula uma posição alvo 'ideal' e depois aloca a máquina o mais próximo possível dessa posição. Seu objetivo é criar o arranjo maximamente distribuído de forma mais simples e rápida do que as abordagens anteriores. Os dados necessários são o número de linhas e colunas do arranjo físico e a quantidade de máquinas de cada processo.

A Figura 2 apresenta o fluxograma de funcionamento do algoritmo. São usadas duas variáveis para contagem, sendo que a variável *i* conta os processos e a variável *j* conta as máquinas de cada processo. Dois blocos do algoritmo contêm procedimentos que serão descritos nos itens seguintes.

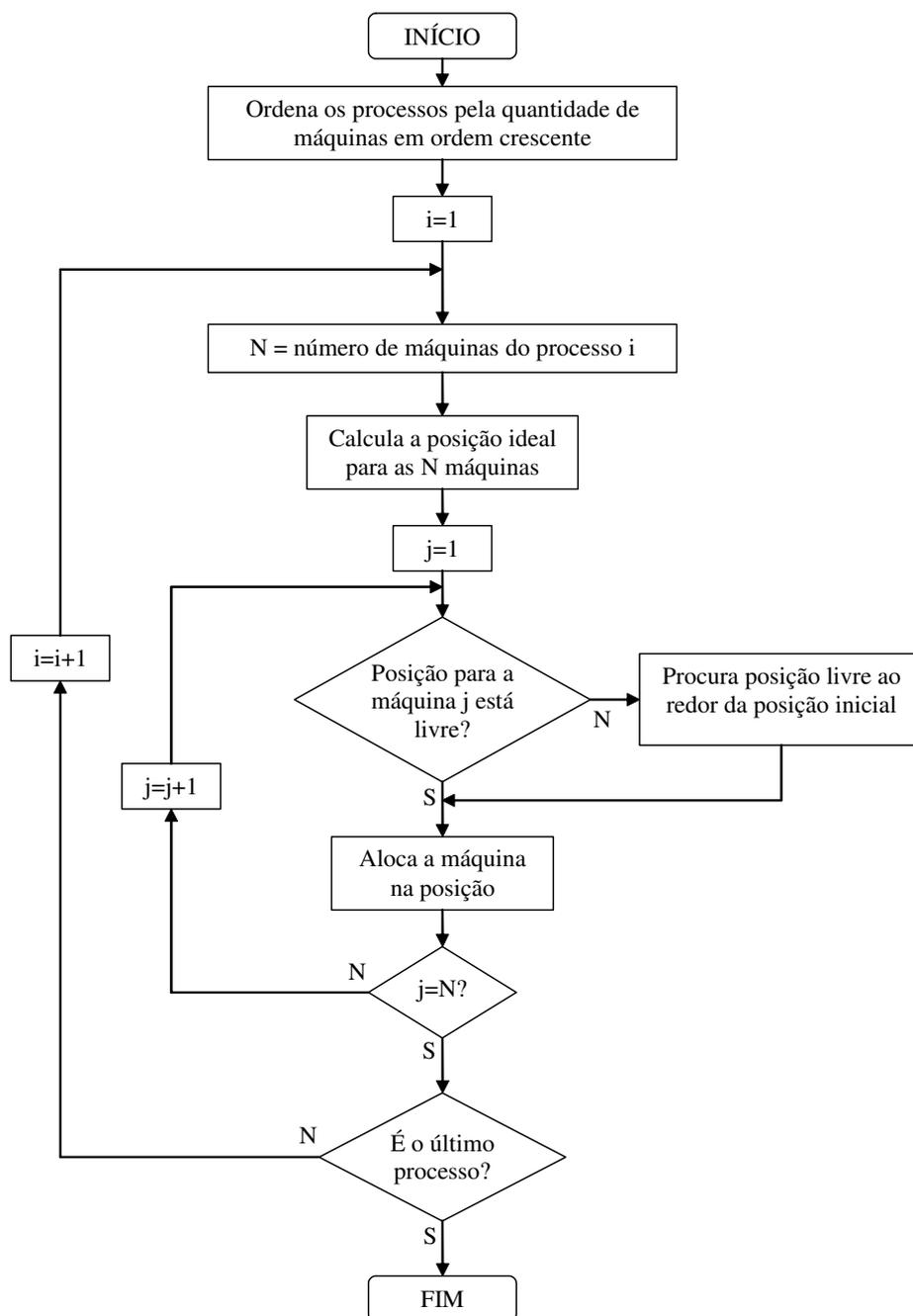


Figura 2 – Fluxograma de funcionamento do algoritmo ALVO.

As primeiras máquinas a serem analisadas garantem a alocação na posição ideal calculada, pois o arranjo físico ainda está vazio. Dessa forma a primeira etapa do algoritmo é ordenar os processos pelo número de máquinas por ordem crescente, garantindo um bom posicionamento de processos com poucas máquinas.

Em seguida o algoritmo verifica quantas máquinas o processo possui e calcula a posição ideal para cada máquina. Esse procedimento será detalhado no próximo item.

Após o cálculo das posições ideais inicia-se o processo de alocação. Se a posição ideal está vaga a máquina é alocada e o procedimento segue para a máquina seguinte. Caso a posição já esteja ocupada inicia-se uma busca por uma posição livre próxima à posição ideal. Esse procedimento é dividido em três etapas. A primeira etapa verifica se uma das quatro posições adjacentes está livre, como mostra a Figura 3.

	3º opção	
2º opção	Posição ideal OCUPADA	1º opção
	4º opção	

Figura 3 – Busca por uma posição livre (etapa 1).

Se uma dessas posições estiver livre a máquina é alocada a apenas um distância retilinear da posição ideal. Se todas as quatro posições estiverem ocupadas passa-se para a segunda etapa que testa quatro posições a duas distâncias retilineares, como mostra a Figura 4.

2º opção	Ocupada	4º opção
Ocupada	Posição ideal OCUPADA	Ocupada
3º opção	Ocupada	1º opção

Figura 4 – Busca por uma posição livre (etapa 2).

Caso todas essas posições estejam ocupadas passa-se para a terceira etapa que irá testar sistematicamente todas as posições em torno da posição ideal, com exceção das 8 posições já testadas, até encontrar uma posição não ocupada, como mostra a Figura 5.

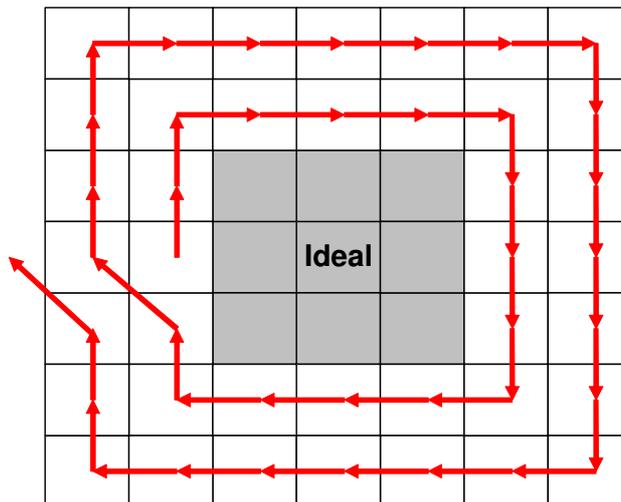


Figura 5 – Busca por uma posição livre (etapa 3).

7. Cálculo da posição ideal

O modelo proposto oferece posições específicas para cada máquina quando o processo possui até 10 máquinas. Acima dessa quantidade as posições são calculadas pela simples divisão da área pelo número de máquinas do processo. As posições são pré-definidas em termos percentuais em relação à dimensão horizontal (x) e vertical (y) do arranjo físico e, durante o cálculo, são convertidos em números inteiros relativos ao número de linhas e colunas.

7.1 Posição para 1 máquina

Para o caso do processo possuir apenas uma máquina a posição lógica é o centro do arranjo físico. Nessa localização minimiza-se a máxima distância a ser percorrida para atingir qualquer outra posição. Neste caso tem-se $x=0.5$ e $y=0.5$, como mostra a Figura 6. As posições percentuais são tomadas a partir do canto superior esquerdo do arranjo físico, tanto neste caso quanto nos casos subseqüentes.

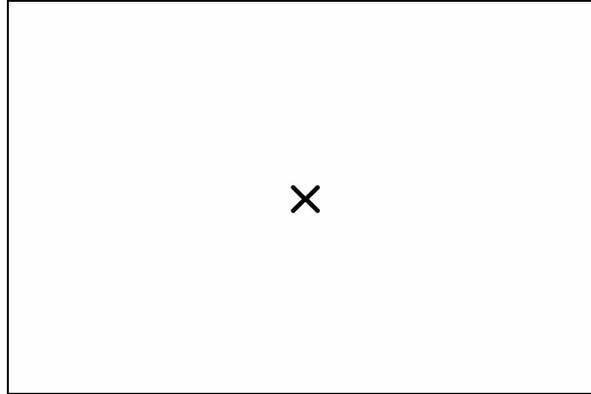


Figura 6 – Posição ideal para 1 máquina.

7.2 Posições para 2 máquinas

Para duas máquinas foram definidas quatro disposições distintas, permitindo que a alocação nas posições ideais ocorra com maior frequência. Cada vez que uma disposição é usada ela é marcada como 'usada'. Dessa forma, se for necessário definir novamente a posição para o mesmo número de máquinas a disposição seguinte é usada. Quando todas tiverem sido aplicadas inicia-se novamente a partir da primeira disposição. A Figura 7 mostra as quatro disposições para o caso do processo possuir 2 máquinas.

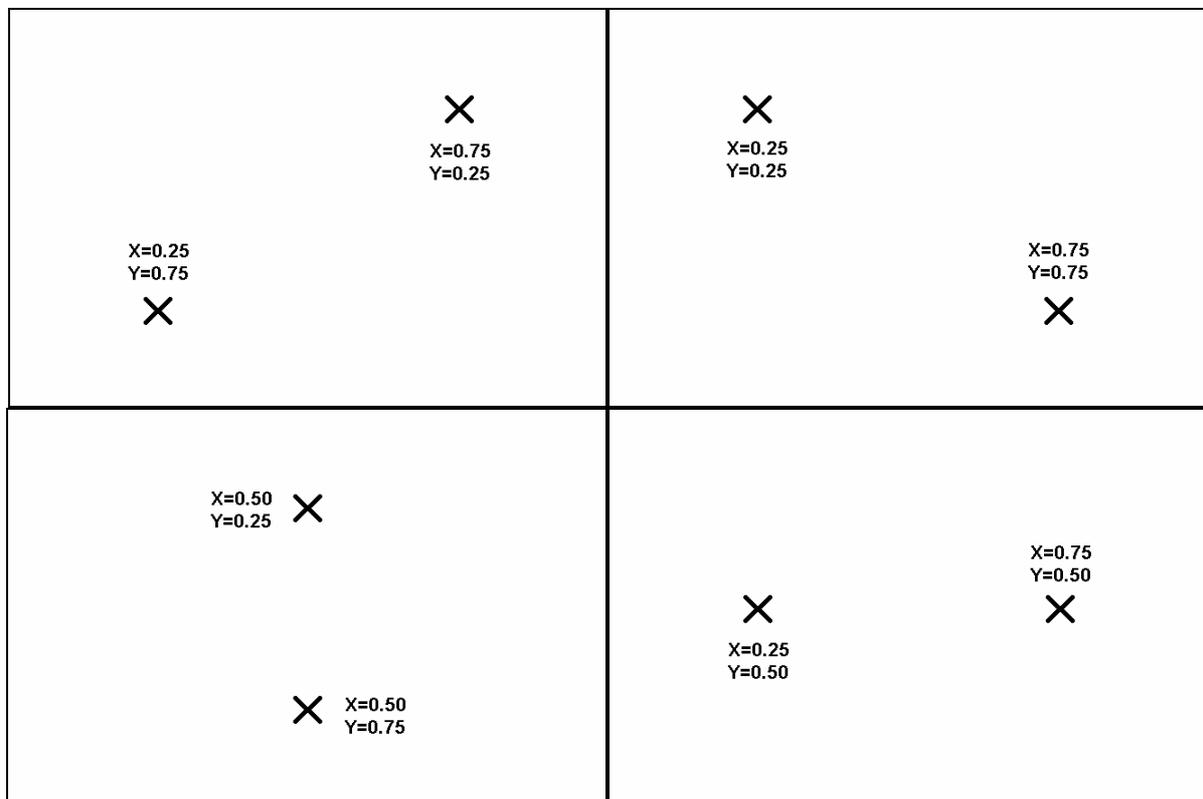
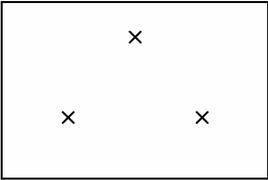
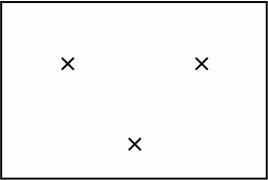
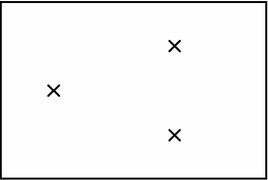
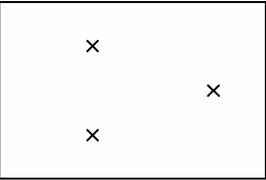
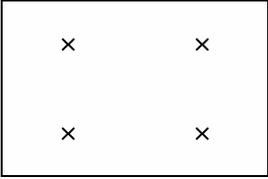
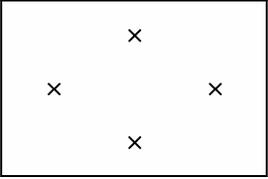
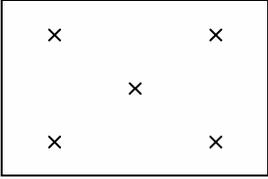
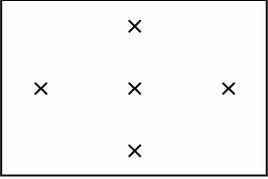
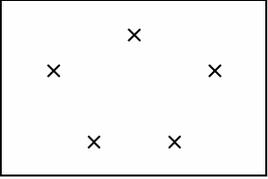
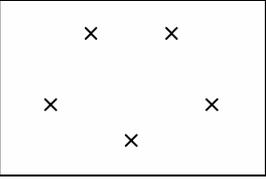
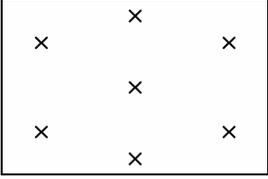
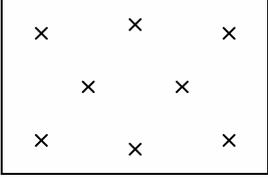
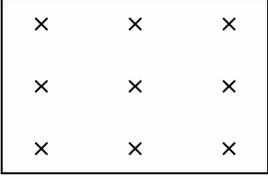
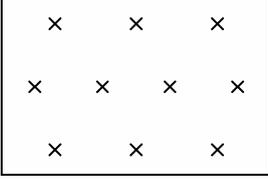


Figura 7 – Quatro disposições ideais para 2 máquinas.

7.3 Posições para 3 à 10 máquinas

O Quadro 1 apresenta as disposições adotadas quando o processo tem entre 3 e 10 máquinas. Alguns possuem apenas uma disposição enquanto outros possuem mais.

3 Máq.				
4 Máq.				
5 Máq.				
6 Máq.				
7 Máq.				
8 Máq.				
9 Máq.				
10 Máq.				

Quadro 1 – Disposições ideais para processos entre 3 e 10 máquinas.

7.4 Posições para processos com mais de 10 máquinas

Foi adotado que acima de 10 máquinas as posições seriam calculadas de uma mesma forma. O procedimento baseia-se na raiz quadrada do número de máquinas, como detalha a Figura 8.

```

N = Número de máquinas
R =  $\sqrt{N}$ 
Se R é um número inteiro então
  Divisão em X = 1 / (R + 1)
  Divisão em Y = 1 / (R + 1)
Senão
  Se parte fracionária de R é menor que 0.5 então
    R = inteiro de R
    Divisão em X = 1 / (R + 2)
    Divisão em Y = 1 / (R + 1)
  Senão
    R = inteiro de R
    Divisão em X = 1 / (R + 2)
    Divisão em Y = 1 / (R + 2)
Fim-se
Fim-se

```

Figura 8 – Procedimento para calcular as posições quando há mais de 10 máquinas.

Supondo 16 máquinas tem-se $R=4$ (número inteiro), ou seja, 4 máquinas na horizontal e 4 máquinas na vertical. Nesse caso o eixo X será dividido em 5 partes ($R+1$), bem como o eixo Y. A dimensão de cada divisão será $1/5 = 0.2$, ou seja, 20% da altura/largura do arranjo.

Com 17 máquinas, como mostra a Figura 9, tem-se $R=4.123$. Como a parte fracionária é menor que 0.5 o eixo X será dividido em 6 partes ($R+2$) e o eixo Y em 5 partes ($R+1$). Em termos percentuais cada divisão do eixo X tem 16.67% e cada divisão do eixo Y tem 20%.

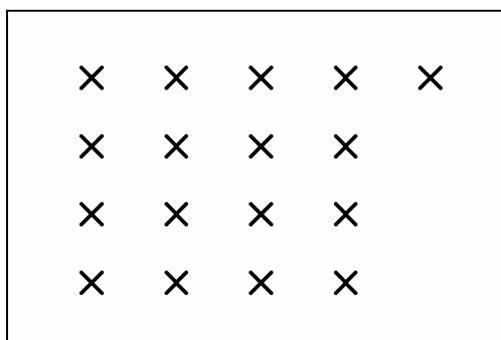


Figura 9 – Posições calculadas para 17 máquinas.

8. Implementação computacional

A metodologia apresentada foi implementada em Visual Basic 6. Além de gerar arranjos maximamente distribuídos também foi implementada a técnica SLP (Space Filling Curves) para gerar arranjos funcionais, parcialmente distribuídos e aleatórios, como mostra o menu da Figura 10. Nota-se que há opções para gerar apenas um arranjo ou múltiplos arranjos físicos. Nessa mesma figura, ao fundo nota-se um arranjo físico funcional criado com os mesmos dados da Figura 1. Cada máquina é representada por um número onde a parte inteira indica o processo e a parte decimal indica a máquina. Na parte inferior da tela há a informação do grau de distribuição obtido, calculado da forma discutida no item 2.

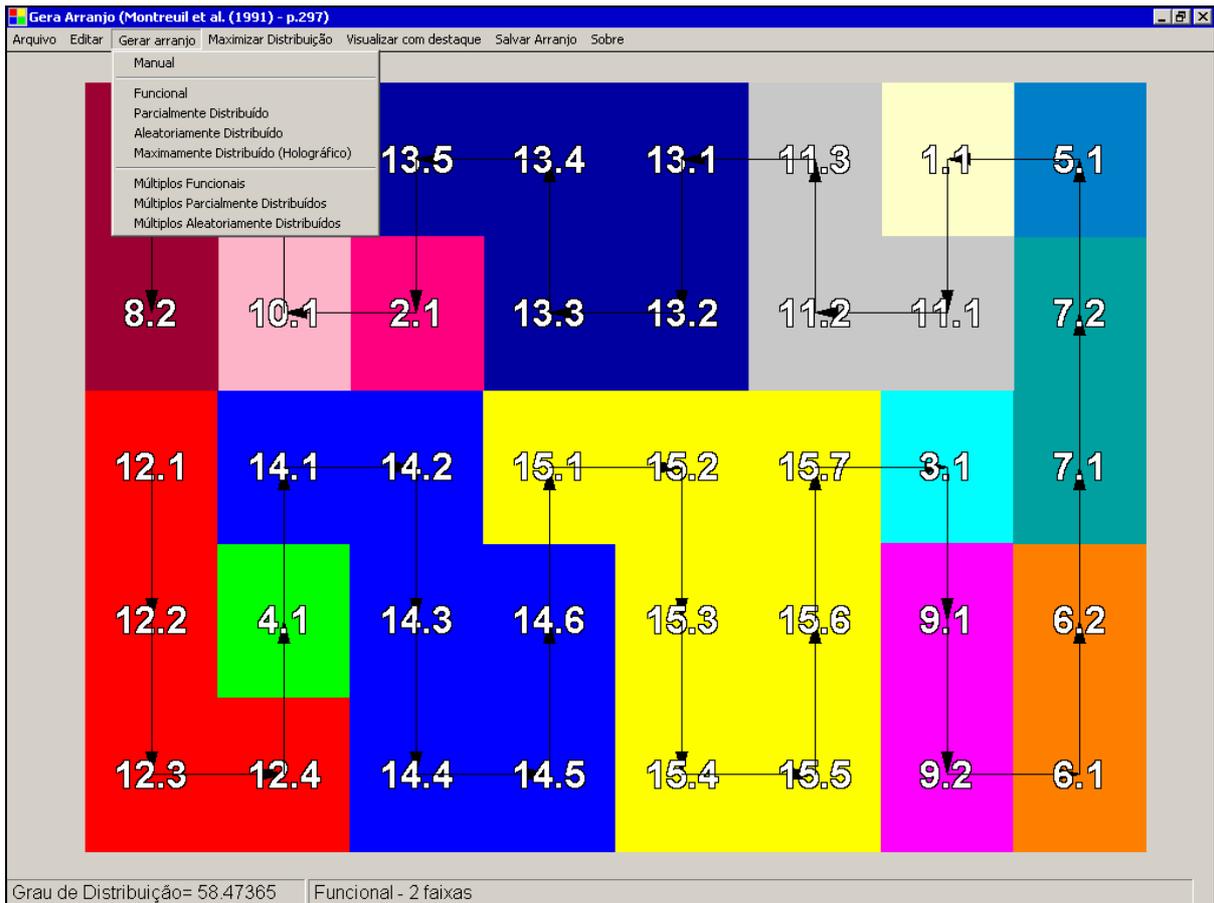


Figura 10 – Tela do gerador de arranjos físicos.

9. Resultados obtidos

A Figura 11 mostra um arranjo físico maximamente distribuído formado com os dados da Figura 1 (15 processos com o número de máquinas por processo variando entre 1 e 7).



Figura 11 – Arranjo físico maximamente distribuído.

Para simplificar a análise dos arranjos foi implementado um modo de visualização com destaque. Esse modo destaca um tipo de processo por vez, como mostram as imagens da Figura 12. Nessas imagens nota-se as formas básicas de atribuição exibidas pelo Quadro 1.

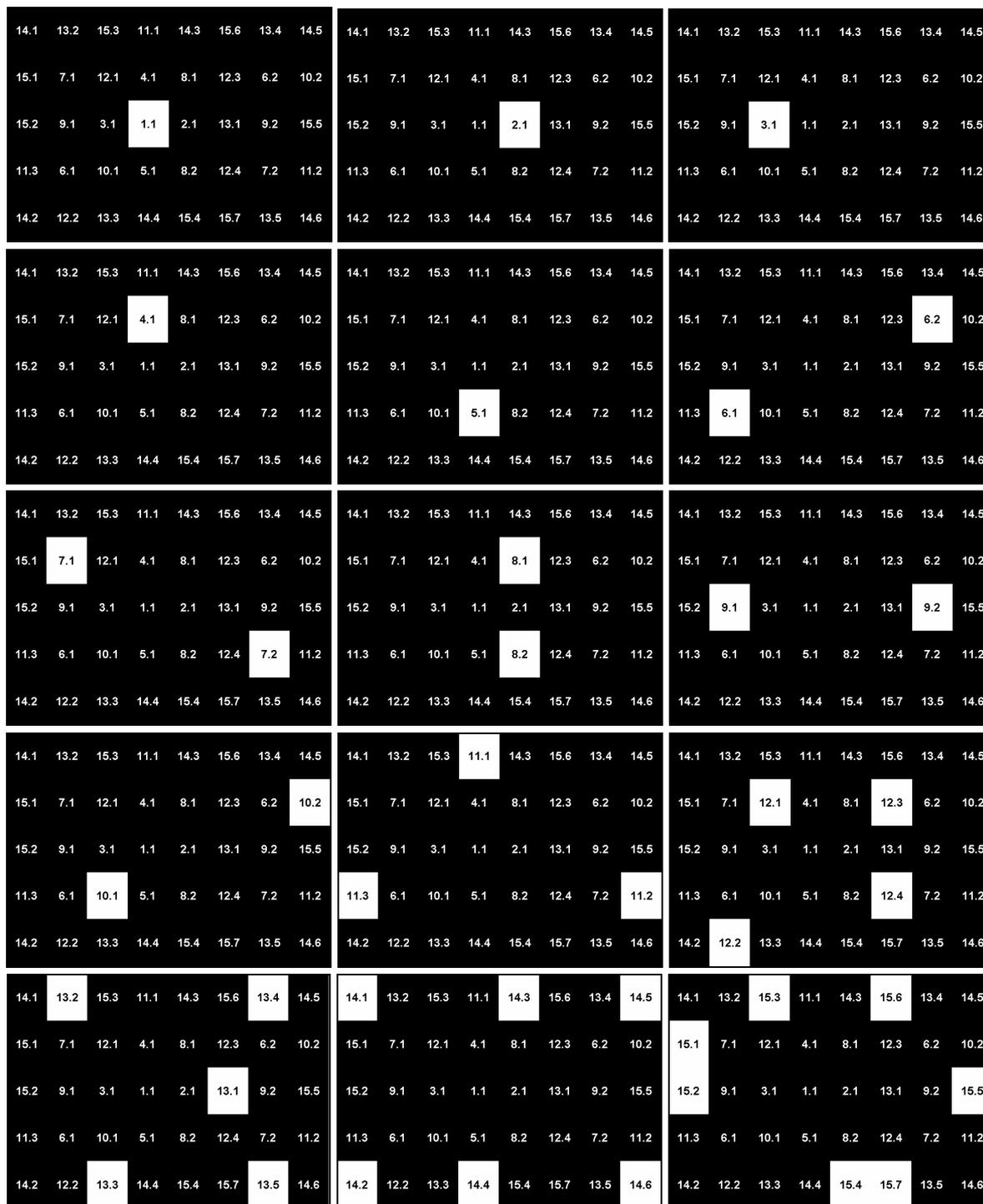


Figura 12 – Posição das máquinas de acordo com o processo.

Em um Athlon XP 2600+ de 2.08 GHz e 1 Gb de RAM a geração do arranjo físico ocorreu em 0.03 segundos e o grau de distribuição obtido pelo algoritmo Alvo foi 32.99238 (calculado em 0.02 segundos). Esse arranjo físico foi submetido a um algoritmo genético que, após 1 hora e 13 minutos, obteve 31.69301, como mostra a Figura 13 (1500 gerações com população de 40 indivíduos). A melhoria obtida pelo algoritmo genético foi de aproximadamente 3.9%.

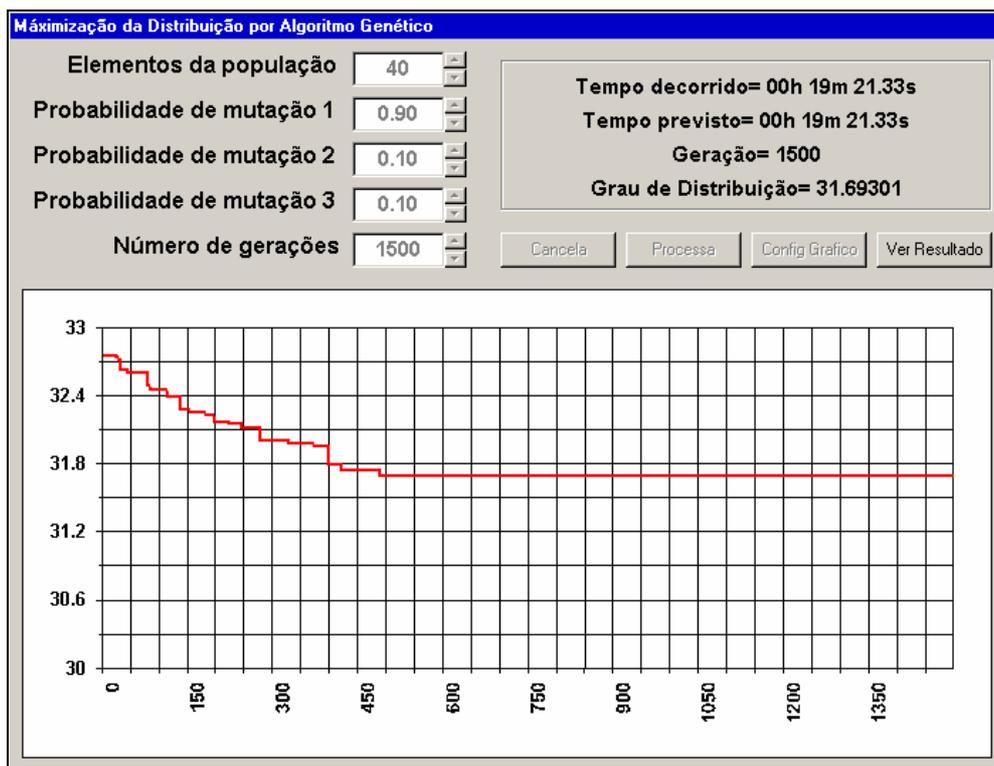


Figura 13 – Evolução do grau de distribuição.

10. Comentários finais

Este artigo mostrou uma nova abordagem para gerar arranjos maximamente distribuídos. A proposta mostrou-se capaz de obter resultados adequados de forma extremamente rápida e sem a necessidade de usar soluções externas de programação linear. Tratando-se de um procedimento heurístico não há garantia de uma solução ótima, mas os resultados mostram que a diferença obtida por meio de um algoritmo genético não é expressiva, principalmente com relação ao tempo consumido.

O arranjo físico apresentado por Montreuil et al. (1993) contendo 1296 máquinas foi testado (36 linhas por 36 colunas). Esse exemplo consiste em 125 tipos de processos com número de máquinas variando entre 1 e 20. A geração do arranjo maximamente distribuído ocorreu em 0.16 segundos mas o cálculo do grau de distribuição levou 1 minuto e 59 segundos (Figura 14).

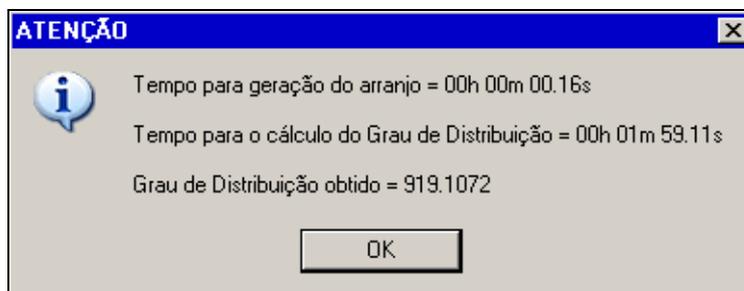


Figura 14 – Tempos para gerar o arranjo físico e para calcular o grau de distribuição.

Devido ao grande consumo de tempo para calcular o grau de distribuição a otimização pelo algoritmo genético passa a ser pouco viável. Usando os mesmos parâmetros mostrados pela Figura 13 para esse arranjo físico o processo levaria cerca de 84 dias para ser concluído (Figura 15). Esse fato torna a relação custo/benefício da metodologia proposta ainda mais interessante pois obtém uma boa solução com um custo computacional desprezível.

Máximizção da Distribuição por Algoritmo Genético	
Elementos da população	40
Probabilidade de mutação 1	0.95
Probabilidade de mutação 2	0.10
Probabilidade de mutação 3	0.10
Número de gerações	1500
Tempo decorrido= 01h 22m 21.92s Tempo previsto= 2008h 43m 25.96s Geração= 1 Grau de Distribuição= 902.0626	
<input type="button" value="Cancela"/> <input type="button" value="Processa"/> <input type="button" value="Config Grafico"/> <input type="button" value="Ver Resultado"/>	

Figura 15 – Estimativa de tempo para otimização do arranjo físico com 1296 máquinas.

O próximo passo será implementar um sistema de programação (*scheduling*) que simulará a execução de conjuntos de peças geradas por um procedimento automático em arranjos criados pelos procedimentos apresentado neste artigo (funcionais, parcialmente distribuídos, aleatoriamente distribuídos e maximamente distribuídos). Entre as análises que serão realizadas inclui-se a comparação entre arranjos gerados pelo algoritmo Alvo e arranjos obtidos pelo algoritmo genético (desde que o custo de processamento não seja excessivo).

Referências

- BAYKASOGLU, A. *Capability-Based Distributed Layout Approach for Virtual Manufacturing Cells*. International Journal of Production Research, v.41, n.11, 2003, p.2597-2618.
- BENJAAFAR, S. *Design of Flexible Layouts for Manufacturing Systems*. Engineering Management Conference, 1995, p.421-427.
- BENJAAFAR, S.; HERAGU, S. S.; IRANI, S. A. *Next Generation Factory Layouts: Research Challenges and Recent Progress*. Interfaces, v.32, n.6, November-December. 2002, p.58-76.
- BENJAAFAR, S.; SHEIKHZADEH, M. *Design of Flexible Layouts for Manufacturing Systems*. Proceedings of the IEEE, International Conference on Robotics and Automation, Minneapolis, Minnesota, April, 1996, p852-857.
- BENJAAFAR, S.; SHEIKHZADEH, M. *Design of Flexible Plant Layouts*. IIE Transactions, v.32, n.4, 2000, p.309-322.
- IRANI, S. A.; HUANG, H. *Custom Design of Facility Layouts for Multi-Product facilities Using Layout Modules*. IEEE Transactions. Robotics Automation, v.16, 2000, p.259-267.
- LAHMAR, M.; BENJAAFAR, S. *Design of Dynamic Distributed Layouts*. INFORMS Fall Meeting, Session TC17: Advances in Factory Layouts, Miami, Florida, November, 2001, 7 p.
- LAHMAR, M.; BENJAAFAR, S. *Design of Dynamic Distributed Layouts*. Proceedings of the 11th Annual Industrial Engineering Research Conference (IERC), Orlando, Florida, May, 2002a, 10p.
- LAHMAR, M.; BENJAAFAR, S. *Design of Dynamic Distributed Layouts*. Working Paper, Department of Mechanical Engineering, University of Minnesota, Minneapolis, 2002b, 30p.
- LAHMAR, M.; BENJAAFAR, S. *Design of Distributed Layouts*. IIE Transactions, v.37, 2005, p.303-318.
- MONTREUIL, B.; VENKATADRI, U. *Scattered Layout of Intelligent Job Shops Operating in a Volatile Environments*. Proceedings of the International Conference on Computer Integrated Manufacturing, Singapore, 1991, p.295-298.
- MONTREUIL, B.; VENKATADRI, U.; LEFRANÇOIS, P. *Holographic Layout of Manufacturing Systems*. Conference: 19th IIE Systems Integration Conference, Systems Integration for Rapid Product Development & Manufacturing, Orlando, Florida, October, 1991, p.2-13.
- MONTEUIL, B.; LEFRANÇOIS, P.; MARCOTTE, S.; 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, 1993, 25 p.
- RHEAULT, M; DROLET, J. R.; ABDULNOR, G. *Physically Reconfigurable Virtual Cells: A Dynamic Model for a Highly Dynamic Environment*. Computers and Industrial Engineering, v.29, n.1-4, 1995, p.221-225.
- VENKATADRI, U; RARDIN, R. L.; MONTREUIL, B. *A Design Methodology for the Fractal Layout Organization*. IIE Transactions., v.29, n.10, 1997, p.911-924.