

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

APLICATIVO PARA MODELAMENTO 3D DE LAYOUT CELULAR
COM BASE EM TECNOLOGIA DE GRUPO

por

Eliseu Silveira Brito

Dissertação para obtenção do Título de
Mestre em Engenharia

Porto Alegre, Dezembro de 2010.

APLICATIVO PARA MODELAMENTO 3D DE LAYOUT CELULAR
COM BASE EM TECNOLOGIA DE GRUPO

por

Eliseu Silveira Brito
Engenheiro Mecânico

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Título de

Mestre em Engenharia

Área de Concentração: Processos de Fabricação

Orientador: Prof. Dr. Flávio José Lorini

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. André João de Souza, PROMEC / UFRGS

Prof. Dr. Giovana Savitri Pasa, PPGEF / UFRGS

Prof. Dr. José Antônio Esmerio Mazzaferro, PROMEC / UFRGS

Prof. Dr. Horácio A Vielmo
Coordenador do PROMEC

Porto Alegre, 15 de Dezembro de 2010.

AGRADECIMENTOS

À Deus, pela saúde e pela vida.

À minha esposa Regina e à meu filho Lucas Gabriel, pelo apoio e compreensão, motivos principais da minha dedicação.

À minha mãe Eva e à minha irmã Nara pelo incentivo recebido.

Ao professor Dr. Flávio José Lorini por ter confiado neste trabalho e pelo tempo dedicado a orientação e revisões.

Aos membros da comissão de avaliação, Prof. Dr. José Antonio Esmerio Mazzaferro, Prof. Dr. André João de Souza e a Prof. Dra. Giovana Savitri Pasa.

Aos colegas, funcionários e demais professores do PROMEC.

Eliseu Silveira Brito

RESUMO

A constante evolução dos sistemas produtivos amplia a importância dada aos projetos de instalações industriais, onde os sistemas celulares possuem uma importância especial, pois tem maior tendência de utilização na atualidade pela engenharia industrial. O sistema celular adota conceitos de tecnologia de grupo, permitindo produzir pequenos lotes e ganhar vantagens econômicas semelhantes às obtidas com produção em massa, não perdendo a flexibilidade da produção por processo. Com a evolução da computação, sistemas integrados de apoio à decisão no planejamento e implantação destes projetos foram surgindo e auxiliando para se ter arranjos físicos adequados as novas exigências de produção, mas o custo de aquisição e desenvolvimento de *softwares* específicos ainda é bastante elevado. Este trabalho apresenta uma solução computacional para o projeto de células através do desenvolvimento de um aplicativo que traduz o resultado de um algoritmo de tecnologia de grupo em opções gráficas de diferentes concepções físicas para o layout da célula, propondo uma função integradora, associando-se uma biblioteca de modelos gráficos de máquinas-ferramenta para representar no chão-de-fábrica diferentes opções de fluxos para o layout. A interface, desenvolvida em Visual Basic, permite tanto o processamento do algoritmo para definição dos grupos de máquinas, baseado em análise de fluxo de produção, quanto a representação no sistema gráfico e interação necessária com banco de dados em padrão Microsoft Access. O modelamento é representado em ambiente gráfico do *software* Solid Edge, que permite a customização necessária para gerar, de modo automatizado, uma interface para o projeto de layout. Na definição das fronteiras dos agrupamentos, ou seja, na delimitação da célula, utiliza-se uma metodologia que os identifica automaticamente, sendo que na maioria dos trabalhos realizados anteriormente estes não previam rotinas automáticas, ficando geralmente a cargo do usuário esta identificação. O sistema desenvolvido tem aplicação como ferramenta no planejamento e projeto de layout, à medida que lança mão de recursos de uma plataforma gráfica comercial (CAD) para representar de modo automatizado, o resultado de algoritmos que normalmente seriam apenas informações textuais. Este trabalho complementa outras aplicações realizadas anteriormente que limitavam-se às definições de células, sem representá-las graficamente, além de possibilitar a escolha da forma de fluxo a ser assumida pela célula, representando um elemento importante para apoio à decisão a quem esteja projetando ou promovendo melhorias em um ambiente industrial.

Palavras-chave: Layout Celular; Tecnologia de Grupo; Automação da manufatura; Projeto de Layout.

ABSTRACT

The constant evolution of production systems increases the importance given to industrial installation projects where the cellular systems have a special importance because of their strong trend to be used today by industrial engineering. The cellular system adopt concepts of group technology making it possible to produce small batches and gain economic advantages similar to those obtained with mass production without losing flexibility in the manufacturing process. With the evolution of computing, integrated systems that give support to the decision process in planning and implementing these designs arose and helped to have physical arrangements adequate for the new production requirements, but the cost of acquiring and developing specific software is still quite high. This paper presents a computational solution for the design of cells by developing an application that translates the result of a group technology algorithm into graphical options of different physical concepts for cell layout, proposing an integrative function, associating a library of machine-tool graphical models to represent on the plant floor different flow options for the layout. The interface is developed in Visual Basic and allows both the processing of the algorithm for defining groups of machines based on production flow analysis as well as a representation on the graphic system and interaction necessary with the database in a Microsoft Access standard. The modeling is represented in a graphical environment using Solid Edge software, which allows the customization needed to generate, in an automated manner, an interface for the layout design. When defining the boundaries of the clusters or limiting the cell, a methodology is used that automatically identifies them, and in most of the designs done previously they did not plan for automatic routines and often this identification became the responsibility of the user. The system developed has an application as an important tool in planning and designing the layout as it makes use of resources of a commercial graphics platform (CAD) to represent automatically the result of algorithms that would normally be just textual information. This paper complements other applications made before that were limited to the definitions of cells without representing them graphically, and makes it possible to choose the form of flow to be assumed by the cell, representing an important element in the decision making process for those who are designing or promoting improvements in an industrial environment.

Keywords: Cell Layout; Group Technology; Manufacturing Automation; Layout Design.

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Objetivo Geral do Trabalho	14
1.2	Objetivos Específicos	14
1.3	Justificativa	14
2	LAYOUT INDUSTRIAL - FUNDAMENTOS	16
2.1	Tipos de Layout	17
2.1.1	Layout Posicional ou de Posição Fixa - <i>Project-Shop</i>	18
2.1.2	Layout em Linha ou por Produto - <i>Flow-Shop</i>	18
2.1.3	Layout Funcional ou por Processo - <i>Job-Shop</i>	19
2.1.4	Layout Celular ou de Grupo - <i>Cellular Layout</i>	20
2.2	Formas básicas de Fluxo	22
2.3	Problema de layout em instalações	23
3	TECNOLOGIA DE GRUPO	24
3.1	Evolução do Sistema de Manufatura Celular	26
3.1.1	Manufatura Celular Virtual	27
3.1.2	Manufatura Celular Dinâmica	28
3.2	Projeto do Layout Celular - Considerações	29
3.3	Restrições no projeto da célula	30
3.3.1	O tamanho da célula	30
3.3.2	Carregamento das máquinas	30
3.3.3	Interdependência de máquinas.....	31
3.3.4	Balanceamento das células	31
3.4	Técnicas de Formação de Células	31
3.4.1	Procedimentos Descritivos	32
3.4.2	Análise de Agrupamentos.....	34
3.4.2.1	Técnica Baseada em Arranjos	34
3.4.2.2	Agrupamento Hierárquico	37
3.4.2.3	Técnicas Heurísticas.....	37
3.4.3	Particionamento Gráfico	37
3.4.4	Programação Matemática	39
3.4.5	Técnicas de Inteligência Artificial	40
3.4.5.1	GA - <i>Genetic Algorithm</i> - Algoritmo Genético	41
3.4.5.2	Redes Neurais (RN)	45
3.4.5.3	<i>Simulated Annealing</i> (SA).....	46
3.4.5.4	<i>Tabu Search</i> (TS) – Busca Tabu	47
3.4.5.5	Modelos <i>Fuzzy</i> (MF).....	47
3.5	Análise das fronteiras da célula	48
4	REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DE LAYOUT	50
4.1	<i>Computer-Aided Layout</i> – Layout auxiliado por computador	52
4.2	Sistemas Comerciais	55
4.3	Integração de Softwares	58
4.4	<i>Computer Aided Cell Layout</i> – Layout Celular Auxiliado por Computador	59
4.5	Proposta do Trabalho	60
5	SISTEMA APLICATIVO DESENVOLVIDO	61
5.1	<i>Softwares</i> utilizados para desenvolvimento do aplicativo	62
5.2	<i>Software</i> utilizado para representação tridimensional	63
5.3	Metodologia para geração das células	63

5.4	Interfaces	64
5.4.1	Módulos para Cadastramento	65
5.4.2	Módulo para Análises	69
5.4.3	Módulo para Configuração e Representação do Layout.....	71
5.4.3.1	Cálculos para posicionamento e dimensionamento das máquinas no layout.....	73
5.4.4	Módulo para controles do sistema	75
6	RESULTADOS E DISCUSSÕES	77
6.1	Validação do Sistema.....	84
7	CONCLUSÕES E SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS	90

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Relação entre volume-variedade e arranjo físico	17
Figura 2.2 - Layout em Linha ou por Produto - <i>Flow-Shop</i>	18
Figura 2.3 - Layout Funcional ou por Processo - <i>Job-Shop</i>	19
Figura 2.4 - Layout Celular ou por Grupo - Cellular Layout.....	20
Figura 2.5 - Formas básicas de Fluxo.....	22
Figura 2.6 - Células eficientes em baixo e alto volume de produção	23
Figura 3.1 - Família de peças.....	24
Figura 3.2 - Exemplo de Agrupamento gerado por um algoritmo.....	26
Figura 3.3 - Layout de um sistema de manufatura com uma Célula Virtual.....	27
Figura 3.4 - Técnicas de Formação de Células.....	32
Figura 3.5 - Representação de uma matriz de incidência Máquina-Peça	34
Figura 3.6 - Matriz de Incidência Peça-Máquina: Primeira Iteração.....	36
Figura 3.7 - Matriz de Incidência Peça-Máquina: Segunda Iteração.....	36
Figura 3.8 - Solução utilizando ROC	36
Figura 3.9 - (a) Grafo bipartido (b) Dois subgrafos.....	38
Figura 3.10 - (a) Grafo de transição (b) Grafo fronteira.....	39
Figura 3.11 - Representação cromossomo célula máquina.....	42
Figura 3.12 - Representação cromossomo grupo-número.....	43
Figura 3.13 - Metodologia para definição de fronteira de célula.....	49
Figura 4.1 - Modelos de máquina em metal	51
Figura 4.2 - Layout de Bloco tipo (a) Discreto e (b) Contínuo.....	52
Figura 4.3 - (a) Layout CRAFT inicial (b) Layout CRAFT Final	53
Figura 4.4 - Representação gráfica típica do (a)Arena (b)Promodel (c)Automod.....	58
Figura 5.1 - Visão geral da estrutura do sistema.....	61
Figura 5.2 - Relacionamentos entre tabelas de dados.....	62
Figura 5.3 - O banco de dados e suas tabelas	62
Figura 5.4 – Fluxograma para definição de agrupamentos.....	64
Figura 5.5 - Interface inicial do aplicativo denominado LayCel3D 1.0	64
Figura 5.6 - Interface de cadastramento de tipo de máquina.....	65
Figura 5.7 - Interface de Cadastramento das Máquinas.....	66
Figura 5.8 - Interface de Cadastramento das Peças	67

Figura 5.9 - Interface de Cadastramento dos Processos	68
Figura 5.10 - Interface de processamento e análise do algoritmo de agrupamento ...	69
Figura 5.11 - a) Fase inicial do algoritmo b) Matriz diagonalizada	70
Figura 5.12 - Fronteira de células definidas	70
Figura 5.13 - Interface para escolha das opções de formas de fluxo para layout	71
Figura 5.14 - Variáveis atribuídas as dimensões de cada máquina	74
Figura 5.15 - Visualização de um layout gerado e suas dimensões representadas	74
Figura 5.16 - Interface controle do sistema	76
Figura 6.1 – Matriz de Incidência gerado pelo LayCel3D.....	77
Figura 6.2 – Matriz Diagonalizada pelo método ROC.....	77
Figura 6.3 - Agrupamentos obtidos mostrados em forma de texto.....	78
Figura 6.4 - Agrupamentos obtidos mostrados em forma de matriz	79
Figura 6.5 – Agrupamentos obtidos de forma automática.....	79
Figura 6.6 - Exemplo de matriz com obtenção de agrupamento único	80
Figura 6.7 - Células a representar automaticamente no LayCel3D	80
Figura 6.8 - Dimensões e área do tapete virtual	81
Figura 6.9 - Modelamento das seis células identificadas pelo Laycel3D	81
Figura 6.10 - Opções de fluxo para layout em Linha, em “L” e em “U”.....	82
Figura 6.11 - Modelamento gerado pelo módulo de importação.....	83
Figura 6.12 - Montagem com as seis células	84
Figura 6.13 - Validação das configurações de fluxo	85
Figura 6.14 - Validação dos modelamentos 3D.....	86
Figura 6.15 - Desenho em 2D da máquina M1 e M2	86
Figura 6.16 - Desenho de um Layout em “U” de duas máquinas – M1 e M2.....	87
Figura 6.17 - Validação do posicionamento - Desenho com máquinas sobrepostas.	87
Figura 6.18 - Validação do algoritmo de posicionamento das máquinas	88
Figura 6.19 - Validação versão SolidEdge x Sistema Operacional	89
Figura 6.20 - Modelamento no SolidEdge versão ST3.....	89

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ADO	ActiveX Data Objects
AG	Algoritmos Genéticos
AGV	<i>Automated Guided Vehicle</i> - Veículo Guiado Automaticamente
BEA	<i>Bond Energy Analysis</i>
CAD	<i>Computer Aided Design</i> – Projeto Auxiliado por Computador
CIA	<i>Cluster Identification Algorithm</i> -
CLP	<i>Cell Layout Problem</i> – Problema de <i>Layout</i> Celular
CMS	<i>Cellular Manufacturing System</i> - Sistema de Manufatura Celular
CNA	<i>Close Neighbour Algorithm</i>
CNC	Comando Numérico Computadorizado
CORELAP	<i>Computerized RElationship LAyout Planning</i> - Planejamento Computadorizado de <i>Layout</i> Relacional
CRAFT	<i>Computerized Relative Allocation of Facilities Technique</i> – Técnica para Alocação Relativa Computadorizada de Instalações
CRP	Carta de Relações Preferenciais
DCA	<i>Direct Clustering Analysis</i>
DCLASS	<i>Design and Classification Information System</i>
DP	<i>Dynamic Programming</i> - Programação Dinâmica
EUA	Estados Unidos da América
FC	<i>Fuzzy Clustering</i>
GA	<i>Genetic Algorithm</i> - Algoritmo Genético
GP	<i>Goal Programming</i> - Programação Objetiva
GRUCON	Grupo de Pesquisas e Treinamento em Comando Numérico e Automatização Industrial
JSPMI	Sociedade Japonesa para a Produção de Máquinas Industriais
LP	<i>Linear Programming</i> - Programação Linear

LQP	<i>Linear and Quadratic Integer Programming</i> - Programação Linear e Quadrática de Números Inteiros
MF	Modelos Fuzzy
MGI	<i>Machine Groups Identification</i> - Identificação de Grupos de Máquinas
MICLASS	Metal Institute Classification System
MODROC	<i>Modified Rank Order Clustering</i>
MPGP	<i>Machine-Part Grouping Problem</i> - Problema de Agrupamento de Peça-Máquina
OIR	<i>Organization for Industrial Research</i> - Organização para Pesquisa Industrial
PF/MG	<i>Part Families/Machine Grouping</i> - Família de Peças/Grupo de Máquinas
PFA	<i>Production Flow Analysis</i> - Análise do Fluxo de Produção
PFI	<i>Part Family Identification</i> - Identificação de Famílias de Peças
PLM	<i>Product Lifecycle Management</i> - Gerenciamento do Ciclo de Vida do Produto
RN	Redes Neurais
ROC	<i>Rank Order Clustering</i>
RP	Reconhecimento de Padrões
SA	<i>Simulated Annealing</i>
SAD	Sistemas de Apoio à Decisão
SCC	Sistemas de Codificação e Classificação
SFC	<i>Space Filling Curves</i> - Curvas de Preenchimento Espacial
SLP	<i>Systematic Layout Planning</i> – Planejamento Sistemático de Layout
SMEs	<i>Small and Medium Enterprises</i> – Pequenas e Médias Empresas
TCR	<i>Total Closeness Rating</i>
TNO	The Netherlands Organization for Applied Scientific Research
TS	<i>Tabu Search</i> – Busca Tabu
VBA	<i>Visual Basic for Applications</i>
VCMS	<i>Virtual Cellular Manufacturing System</i> - Sistema de manufatura celular virtual

LISTA DE SÍMBOLOS

a	número de máquinas no primeiro segmento do layout
a_{ij}	representação de elemento na matriz de incidência
b	número de máquinas no segundo segmento do layout
Ci_m	valor mínimo funcional referente ao espaço frontal da máquina
C_m	dimensão transversal
Cs_m	valor mínimo funcional do espaço da parte de trás da máquina
i,j	respectivamente, linha e coluna da matriz de incidência
Ld_m	valor mínimo funcional do Lado direito
Le_m	valor mínimo funcional referente ao Lado esquerdo
L_m	dimensão longitudinal
m	representa cada uma das máquinas
n	número total de máquinas
x	dimensão longitudinal do tapete virtual de uma célula
x_m	dimensão longitudinal do tapete virtual de uma máquina
y	dimensão transversal do tapete virtual de uma célula
y_m	dimensão transversal do tapete virtual de uma máquina
*	dimensão transversal da maior máquina no segmento em questão
**	somatório das dimensões transversais no segmento em questão

1 INTRODUÇÃO

A constante evolução dos sistemas produtivos, passando de sistemas de produção em massa para sistemas de produção centrados nas necessidades dos clientes, amplia a importância dada aos projetos de instalações industriais, onde a estratégia da produção é materializada no arranjo físico. Também chamado de layout, este diz respeito à localização física dos recursos de transformação e é uma das características mais evidentes de uma operação produtiva porque determina sua forma e aparência. A realização de mudanças no layout de uma fábrica afeta o fluxo de materiais e pessoas através da operação, podendo influenciar os custos e a eficácia geral da produção.

Segundo Slack *et al.*, 1999, o arranjo físico é freqüentemente uma atividade difícil e de longa duração devido às dimensões físicas dos recursos de transformação movidos. O rearranjo físico de uma operação existente pode interromper seu funcionamento suave, levando à insatisfação dos clientes ou a perdas de produção. Se um arranjo físico estiver inadequado pode levar a padrões de fluxo excessivamente longos ou confusos, estoque de materiais, filas de clientes formando-se ao longo da operação, altos custos, etc. Estes pontos citados evidenciam a importância de um estudo detalhado para a implantação de um layout adequado.

Com a evolução da computação, sistemas integrados de apoio à decisão no planejamento e implantação de instalações industriais foram surgindo e auxiliando para se ter arranjos físicos adequados as novas exigências de produção. Apesar dos avanços tecnológicos, muito ainda há que se fazer, pois embora o custo de equipamentos venha sendo reduzido a cada dia, o custo de aquisição e desenvolvimento de *softwares* específicos ainda é bastante elevado. Este aspecto é um dos fatores que leva a este trabalho; desenvolver um sistema, como um aplicativo para modelamento 3D de layout celular através de algoritmo utilizando tecnologia de grupo ou através de importação de resultados de algoritmos específicos.

1.1 Objetivo Geral do Trabalho

Desenvolver uma solução computacional para modelamento 3D de layout celular através de algoritmo utilizando tecnologia de grupo e importação de resultados com ênfase em ambientes industriais que possuam como principal meio de fabricação o processo de usinagem e layouts celulares.

1.2 Objetivos Específicos

- Conhecer o estado da arte relativo à Layout Industrial e identificar elementos úteis no desenvolvimento da pesquisa.
- Pesquisar e selecionar *softwares* adequados ao estudo.
- Criar aplicativo integrando os conhecimentos e *softwares* pesquisados, onde este possua um algoritmo próprio para definição dos agrupamentos (família de peças e máquinas por célula), mas que principalmente tenha a capacidade de gerar layout através da importação de resultados de outros algoritmos para casos complexos, onde condições específicas sejam necessárias. Para casos simples, o *software* deve permitir a criação de células manualmente e possibilitar ao usuário do aplicativo que o modelamento gerado tenha a característica de poder ser editado e também exportado para outros ambientes gráficos. Este aplicativo deve ter características que possibilite sua utilização no ambiente acadêmico e na indústria.

1.3 Justificativa

Conforme Drolet *et al.*, 1996, o ciclo de vida dos produtos tende a ser cada vez menor; isto força as organizações de manufatura a reduzirem o ciclo de desenvolvimento de novos produtos, aumentarem a responsabilidade e a flexibilidade, além de diminuírem o tempo de *setup* e baixarem os inventários entre processos para manter uma eficiência aceitável. Estas mudanças estão intimamente ligadas à disposição dos recursos para a produção, e um sistema de apoio à decisão na definição de layout se torna cada dia mais importante para obtenção de melhores resultados no planejamento de sistemas de manufatura.

De acordo com Heragu, 2006, companhias de manufatura e serviço dispendem quantidades significativas de tempo e dinheiro para desenhar e redesenhar suas instalações.

Um desenho pobre custa para a companhia quantias significantes e resultados de baixa qualidade, além de empregados com baixo moral e clientes insatisfeitos.

Tompkins *et al.*, 1996, afirmam que a mudança é a única coisa certa de ocorrer no futuro e planejar-se para a mudança ajudará a garantir que uma organização seja capaz de se adaptar e manter-se competitiva.

Esta pesquisa se justifica também em função da proposta da não utilização de novos métodos ou desenvolvimento de um *software* para modelamento, mas agrupar e utilizar soluções já existentes, estudadas, mas aplicadas isoladamente, como por exemplo, recursos disponíveis nos *softwares* comerciais de modelamento que são pouco conhecidos e utilizados, citando mais especificamente, a linguagem de programação *ActiveX Automation* para automatizar tarefas no *software* de modelamento.

A possibilidade de o usuário editar o modelo gerado pelo aplicativo ou exportar este para outros ambientes gráficos, além da capacidade de gerar layout através da importação de resultados de outros algoritmos e montar células manualmente para casos simples é um diferencial que este sistema apresenta.

E, por fim, este trabalho complementa vários trabalhos realizados anteriormente que realizavam as definições de células, mas não as representavam graficamente, sendo isto de fundamental importância para quem está projetando ou promovendo melhorias em um ambiente industrial.

Para fundamentação teórica de aspectos do conhecimento diretamente associados ao projeto de instalações industriais, notadamente sistemas celulares, uma revisão bibliográfica procura destacar os principais fundamentos teóricos pertinentes ao tema.

2 LAYOUT INDUSTRIAL - FUNDAMENTOS

O layout ou arranjo físico consiste da organização racional de todos os recursos e tecnologias necessárias para se conseguir em nível operacional os objetivos da empresa industrial, materializando-se na forma como esses recursos serão dispostos no espaço tridimensional. Como organização racional entende-se a busca da harmonização e integração de equipamentos, mão-de-obra (direta e indireta), materiais, áreas de movimentação e de estocagem e demais recursos e tecnologias [Olivério, 1985].

Decisões sobre arranjo físico não são tomadas exclusivamente quando se projeta uma nova instalação, mas dadas as implicações que este pode ter no próprio desempenho da operação, as decisões devem ser reavaliadas e eventualmente refeitas sempre que houver um novo recurso consumidor de espaço acrescentado ou retirado, se decidir pela modificação de sua localização, houver uma expansão ou redução de área da instalação, ocorrer uma mudança relevante de procedimentos ou fluxos físicos, houver uma alteração substancial do *mix* de produtos que afete substancialmente os fluxos ou uma mudança substancial na estratégia competitiva da organização [Corrêa e Corrêa, 2006].

Conforme Junior, 2004, os fatores que determinam o estudo de um layout são:

1. obsolescência das instalações: as instalações tornam-se ineficientes devido a novos produtos a serem fabricados, aquisição de máquinas exigindo ampliações de espaço, avanço na tecnologia, necessidade de maior espaço para estocagem ou melhoria dos métodos de trabalho;
2. redução dos custos de produção;
3. variação na demanda: aumento ou um decréscimo na produção;
4. ambiente de trabalho inadequado: ruídos, desconforto térmico, pouca ventilação, má iluminação baixam o rendimento do trabalhador, acidentes podem ser evitados com melhor layout;
5. excesso de estoques: um indício de que o fluxo de produtos não está bom;
6. manuseios excessivos: provocam danos no material em produção;
7. instalação de uma nova fábrica.

De acordo com Heragu, 2006, o problema de layout em um sistema de manufatura envolve determinar a localização das máquinas, estações de trabalho e outros departamentos com o objetivo de minimizar o custo de transporte de materiais, peças, ferramentas, trabalho em processo e trabalho acabado entre departamentos, facilitar o fluxo ou o tráfego, aumentar a

moral dos trabalhadores, minimizar o risco de ferimentos para os funcionários e danos para as peças e, quando necessário, prover para a supervisão uma comunicação direta. Junior, 2004, ainda complementa como resultado de um bom layout um ambiente de trabalho apropriado: menos riscos para saúde e segurança do operário, maior satisfação e elevado moral dos operadores e melhoria na aparência, maior produção em menor tempo, redução em manuseios e espaço percorrido, economia de espaço, menores demoras de produção, melhor e mais fácil supervisão, menores danos ao material e às suas atividades e ajustamento mais fácil às mudanças. Ainda segundo Corrêa e Corrêa, 2006, um bom projeto de arranjo físico pode visar tanto eliminar atividades que não agreguem valor como enfatizar atividades que agreguem, como por exemplo, mínima movimentação, máximo uso do espaço, minimização de gargalos, flexibilidade para rearranjo e crescimento, arranjos físico e ambiental satisfatórios e ordenação no transporte e armazenagem de materiais.

2.1 Tipos de Layout

Há, basicamente, quatro tipos de arranjo físico que têm características bastante específicas e apresentam diferentes potenciais de contribuir e até de alavancarem diferentes desempenhos. São eles: Layout Posicional (por posição fixa), Layout em Linha (por produto), Layout Funcional (por processo) e Layout de Grupo (Celular). Conforme Slack *et al.*, 1999, a decisão de qual tipo de layout adotar pode ser auxiliada pela relação entre volume de produção e variedade de produtos, conforme mostrado na Figura 2.1. Nota-se que as faixas de volume e variedade contidas em cada tipo de arranjo físico se sobrepõem e a decisão sobre qual arranjo físico escolher é influenciada pelo entendimento das vantagens e desvantagens de cada um.

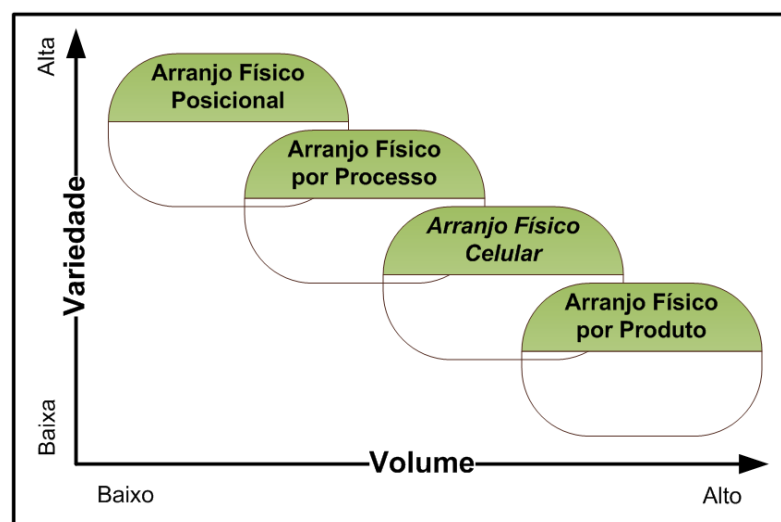


Figura 2.1 - Relação entre volume-variedade e arranjo físico

Os quatro tipos de layout, citados por diversos autores, são vistos com mais detalhes a seguir [Francis *et al.*, 1992; Tompkins *et al.*, 1996; Singh e Rajamani, 1996; Groover, 2001; Corrêa e Corrêa, 2006].

2.1.1 Layout Posicional ou de Posição Fixa - *Project-Shop*

Neste tipo de layout o material (recursos transformados) permanece fixo em uma determinada posição e as máquinas, pessoas, equipamentos, etc. (recursos transformadores) se deslocam até o local executando as operações necessárias. Este tipo de arranjo físico é utilizado quando o produto é muito grande para ser movido de forma conveniente, ou pode ser (ou estar em um estado) muito delicado para ser movido.

Exemplos deste tipo de layout são aplicados à construção civil, à fabricação de navios, aviões, grandes transformadores elétricos, turbinas, pontes rolantes, grandes prensas, etc.

2.1.2 Layout em Linha ou por Produto - *Flow-Shop*

Este tipo de layout arranja os recursos produtivos transformadores (máquinas, equipamentos, pessoas, etc.) segundo a melhor conveniência do recurso que está sendo transformado (produto), ou seja, as máquinas são colocadas de acordo com a sequência das operações do produto e são executadas de acordo com a sequência estabelecida sem caminhos alternativos. Os recursos são arranjados fisicamente conforme a necessidade do produto a ser produzido.

O layout em linha é utilizado quando uma sequência de etapas do processo é percorrida por um grande volume de fluxo. Indústrias com processos relativamente simples, linhas de montagem ou produção com pouca ou nenhuma diversificação, em quantidade constante ao longo do tempo e em grande quantidade, se utilizam deste tipo de layout, conforme exemplifica a Figura 2.2. A produtividade fica condicionada à velocidade da linha, que deve ser adequadamente balanceada e a mão-de-obra aplicada é relativamente pequena.

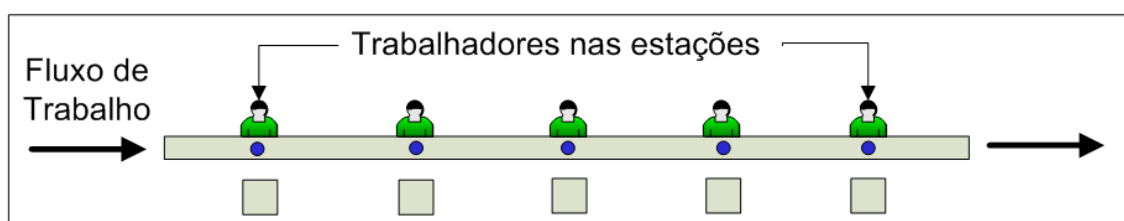


Figura 2.2 - Layout em Linha ou por Produto - *Flow-Shop*

Os exemplos mais clássicos são linhas de montagem de automóveis, aparelhos eletrônicos, indústrias químicas, petroquímicas, de papel, do aço, etc.

2.1.3 Layout Funcional ou por Processo - *Job-Shop*

A lógica deste tipo de arranjo é a de agrupar recursos com funções ou processos similares. Neste tipo de layout todos os processos e equipamentos do mesmo tipo são desenvolvidos na mesma área e também operações ou montagens semelhantes são agrupadas na mesma área. O material se desloca buscando os diferentes processos. Geralmente é usado quando os fluxos que passam pelos setores são muito variados e ocorrem intermitentemente.

Segundo Corrêa e Corrêa, 2006, o desafio neste tipo de layout é procurar arranjar a posição relativa e as áreas de cada setor, de forma a aproximar setores que tenham fluxo intenso entre si, para evitar deslocamentos desnecessários, de maneira a encaixar adequadamente o posicionamento e as áreas resultantes na área total disponível, respeitando uma série de restrições que possa haver.

É característica deste arranjo a flexibilidade para atender a mudanças do mercado, atender produtos diversificados em quantidades variáveis ao longo do tempo, apresentar um fluxo grande dentro da fábrica e é adequado para produções em pequenas e médias quantidades. Conforme Lorini, 1993, este tipo de layout é o mais comum e antigo encontrado nas instalações industriais de manufatura. Todas as máquinas de um mesmo tipo são dispostas juntas, constituindo seções, como por exemplo, de tornos, fresadoras, furadeiras, retíficas, etc., conforme mostra a Figura 2.3.

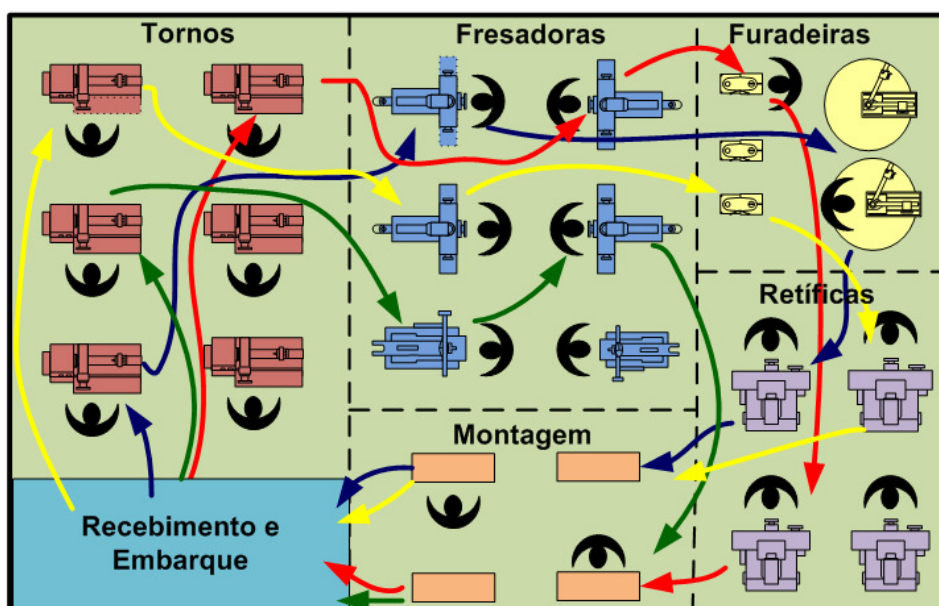


Figura 2.3 - Layout Funcional ou por Processo - *Job-Shop*

Supermercados, hospitais, indústrias de usinagem, ferramentarias, bibliotecas, lojas de departamentos, etc. são exemplos deste tipo de layout.

2.1.4 Layout Celular ou de Grupo - *Cellular Layout*

O arranjo físico celular é aquele em que os recursos transformados, entrando na operação, são pré-selecionados para movimentar-se para uma parte específica da operação (célula) na qual todos os recursos transformadores necessários a atender a suas necessidades imediatas de processamento se encontram. Resumidamente, conforme ilustrado na Figura 2.4, uma célula de manufatura consiste em arranjar em um só local (a célula) máquinas diferentes que possam fabricar inteiramente o produto ou uma família de peças. O material se desloca dentro da célula buscando os processos necessários. A célula em si pode ser organizada seguindo um arranjo físico por processo ou por produto.

Este arranjo tem como características uma relativa flexibilidade quanto ao tamanho do lote por produto, é específico para uma família de produtos, diminui o transporte de material, diminui os estoques, centraliza a responsabilidade sobre o produto fabricado e permite elevado nível de qualidade e produtividade.

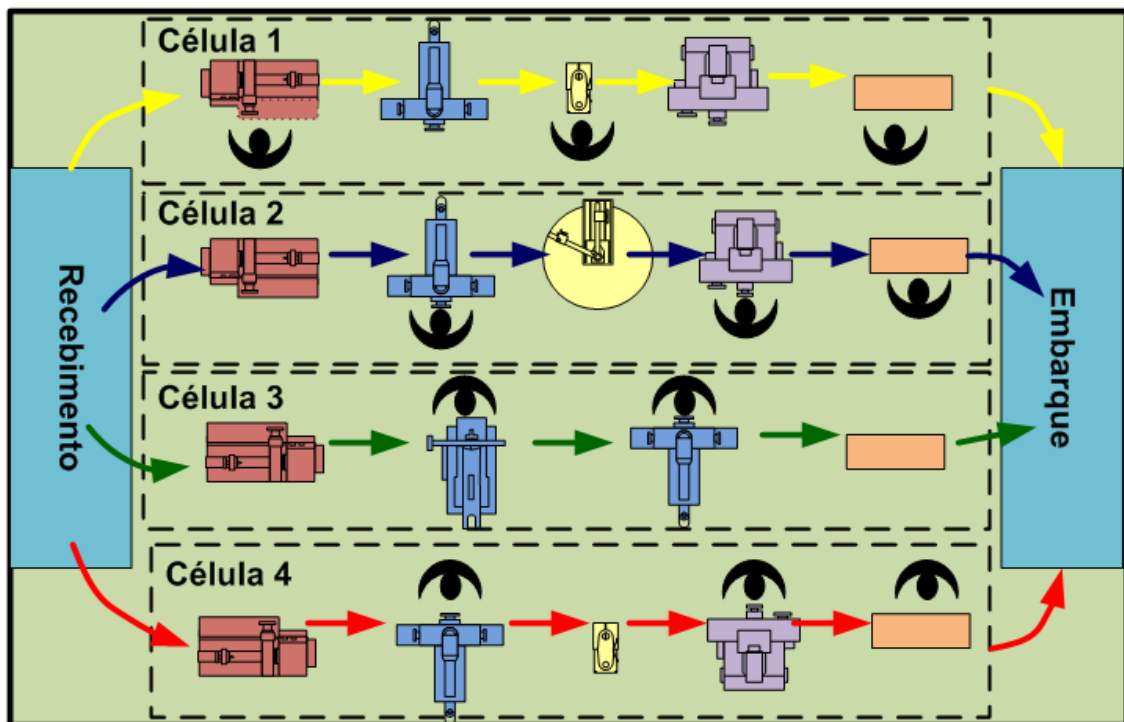


Figura 2.4 - Layout Celular ou por Grupo - Cellular Layout

Segundo Corrêa e Corrêa, 2006, o arranjo celular é baseado no conceito de tecnologia de grupo, onde recursos não similares são agrupados de forma que, com suficiência, consigam processar um grupo de itens que requeiram etapas similares de processamento. Para se desenvolver um arranjo celular são sugeridas as seguintes etapas:

1. identificar famílias de itens produzidos que tenham, agregadamente, volume suficiente e similar conjunto de recursos para serem processados;
2. identificar e agrupar recursos (máquinas, pessoas) de forma que consigam, com suficiência, processar as famílias de itens identificadas, definindo células;
3. para cada célula, arranjar os recursos, usando os princípios gerais do arranjo por produto, estabelecendo uma pequena operação dentro da operação, de forma que a movimentação e os fluxos daquelas famílias identificadas na etapa um sejam mais ordeiros, simples e ágeis.

Conforme Lorini, 1993, este é o tipo de layout com maior tendência de utilização pela engenharia industrial, em que se busca, no suprimento do processo necessário, a produção de determinadas peças, uma especialização por componentes, quando se determina o arranjo. Este arranjo reúne as vantagens dos arranjos em linha e funcionais, pois se dispõe de todas as máquinas próximas umas das outras, na seqüência mais adequada ao processo, ao mesmo tempo em que se tem a flexibilidade de execução, não mais para um só produto, mas para uma família deles.

No entanto, são necessários alguns cuidados, pois Huq *et al.*, 2001, mostram em seu estudo que, dependendo do projeto e restrições nas células de um sistema de manufatura com layout celular, podem-se ter resultados inferiores aos apresentados por um com layout funcional. Eles confirmam estudos anteriores que também chegaram a esta mesma conclusão. Os principais fatores que influenciam este desempenho são o tamanho do lote e a necessidade da redução nos tempos de *setup*, sendo necessário uma análise detalhada para verificar as reais melhorias que resultarão da troca de um layout funcional para um celular.

Já outros estudos mostram casos bem positivos em relação a layout celular. Molleman *et al.*, 2002, descrevem em seu trabalho a evolução de um sistema de manufatura celular em uma empresa de médio porte ao longo de treze anos. Os resultados mais significativos foram sentidos imediatamente após a implantação da estrutura de manufatura celular, como em outros casos estudados pelo autor, onde houve significativas reduções de trabalhadores indiretos, prazos de entrega, tempo de produção, etc. Ao longo dos anos, melhorias continuaram sendo percebidas em função da necessidade de ajustes contínuos, principalmente

em função das mudanças de mercado e tecnologia de fabricação, sendo considerado um projeto de manufatura celular bem sucedido. Um estudo mais antigo, mas que mostra também resultados obtidos e uma listagem de lições aprendidas, foi realizado por Wemmerlöv e Hyer, 1989, em trinta e duas indústrias dos Estados Unidos.

2.2 Formas básicas de Fluxo

No contexto de um layout celular a disposição dos postos de trabalho pode ser estabelecida em diferentes configurações, considerando sua adequação às áreas físicas disponíveis, bem como o sistema de movimentação adotado.

Francis *et al.*, 1992, consideram vários tipos de padrão de fluxo, identificando cinco tipos básicos, conforme mostrado na Figura 2.5.

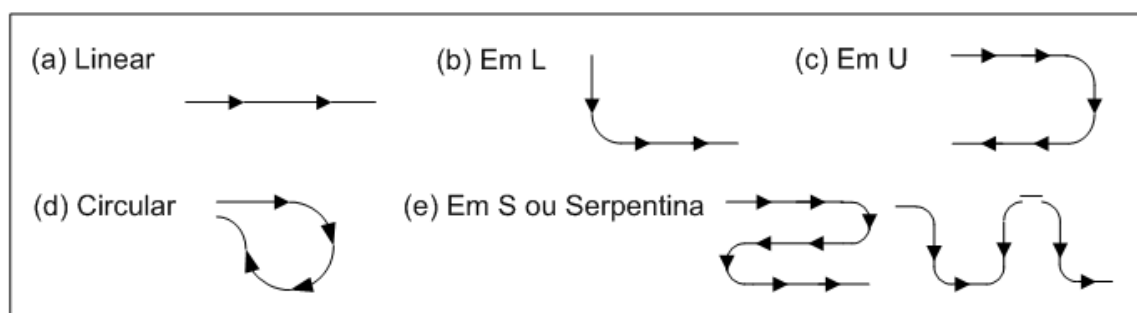


Figura 2.5 - Formas básicas de Fluxo

O fluxo linear é o fluxo de forma mais simples. De qualquer forma, quando empregado em uma planta, separa o pessoal de recebimento e o de expedição, como normalmente requerido. O padrão de fluxo em “L” é normalmente adotado quando um fluxo em linha não pode ser acomodado em uma instalação já existente ou custos de construção não permitem um fluxo em linha. A forma em “U” de padrão de fluxo é a mais popular, pois é simples de administrar e combina as atividades de recebimento e expedição. O padrão circular é aplicado quando se deseja terminar o fluxo muito próximo do ponto onde o fluxo se originou. O padrão de fluxo em serpentina pode ser aplicado quando a linha de produção é muito longa e um formato em ziguezague seja necessário para possibilitar colocar no espaço disponível a linha de produção. Esses padrões de fluxo permitem, quando os volumes de produção estão baixos, trabalhar com um número mínimo de operadores e, quando a demanda está em alta, o número de operadores pode ser aumentado. Joseph, 2006, cita um exemplo de layout de célula com alta eficiência: um fluxo em “U” que, quando em baixa, trabalha com um operador e, quando em alta, utiliza dois operadores, conforme mostrado na Figura 2.6.

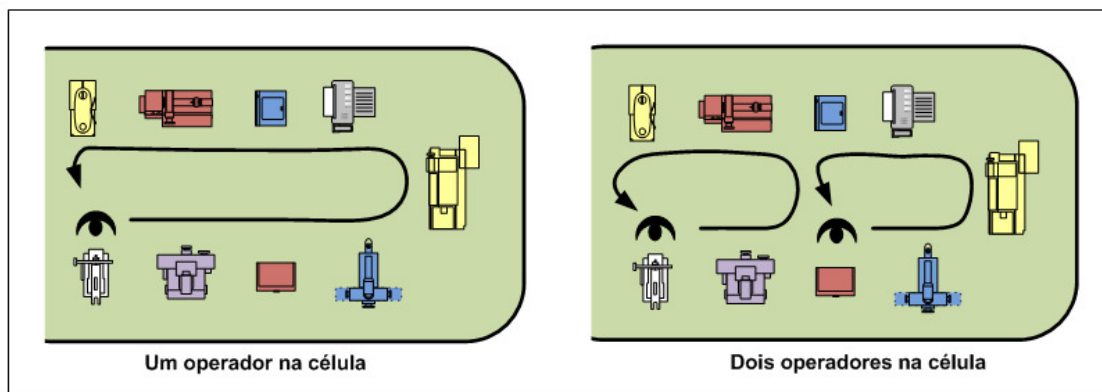


Figura 2.6 - Células eficientes em baixo e alto volume de produção

2.3 Problema de layout em instalações

Segundo Drira *et al.*, 2007, a colocação de utilidades em uma área de uma fábrica, referido na literatura inglesa como “*facility layout problem*”, tem um significativo impacto sobre os custos de manufatura, estoque em processo, tempo de entrega e produtividade. Como “*facility layout*” entende-se o arranjo de tudo que se precisa para a produção de mercadoria ou serviço, uma “*facility*” é um recurso que facilita a performance de qualquer trabalho. Ela pode ser uma máquina ferramenta, um centro de trabalho, uma célula de manufatura, um departamento, um depósito, etc. Como consequência da importância deste tema, uma grande quantidade de pesquisas tem sido feita durante a última década. Devido à variedade de considerações encontradas nestes artigos, pesquisadores não concordam sobre uma exata definição de “*layout problems*”, mas Drira *et al.*, 2007, apresentam o que caracteriza um “*layout problems*”, com os diferentes fatores pesquisados na literatura. Os principais são: o tipo de sistema de manufatura, o formato da instalação, a configuração do layout, o sistema de transporte de material, a evolução do layout, a formulação do layout, os objetivos, as restrições e a abordagem para resolução do problema. Cada um destes fatores se abrem em suas possibilidades e áreas de estudo específicas ou relacionadas com algum outro, conforme definição em cada estudo ou necessidade de utilização.

Nesta rápida revisão bibliográfica sobre layout, abordou-se apenas os tópicos que dão uma idéia inicial do vasto campo que o layout está inserido e que de alguma forma estão ligados a esta pesquisa, pois conforme mostrado no parágrafo anterior, esta questão é extremamente vasta e abrangente, sendo inviável revisar assuntos que não estão ligados ao objeto de estudo desta pesquisa, que é o layout celular. Desta forma assuntos sempre abordados nos livros clássicos sobre instalações e layout como o Tompkins *et al.*, 1996; Francis *et al.*, 1992 e Heragu, 2006, ficaram de fora desta revisão.

3 TECNOLOGIA DE GRUPO

Burbidge, 1979, define tecnologia de grupo como uma abordagem da organização para o trabalho em que cada unidade organizacional é um grupo relativamente independente, responsável pela produção de uma família de produtos. Lorini, 1993, conceitua tecnologia de grupo como uma filosofia que define a solução de problemas explorando semelhanças, para se obter vantagens operacionais e econômicas mediante um tratamento de grupo. Groover, 2001, define tecnologia de grupo como uma filosofia de manufatura em que partes similares são identificadas e agrupadas juntas para tirar vantagens de suas similaridades em desenho e produção. Partes similares são arranjadas em famílias de peças, onde cada família possui desenho e características de fabricação similares. Agrupando os equipamentos de produção em células, onde cada célula se especializa na produção de uma família de peças, passa-se a ter o que se chama de manufatura celular.

Segundo Singh e Rajamani, 1996, os maiores problemas em manufatura de lotes ou por processo são os altos níveis de variedade de produto e o pequeno tamanho dos lotes a serem fabricados. O impacto dessas variações é a necessidade de altos investimentos em equipamentos, ferramentas, sistemas de planejamento, tempos longos de *setup* com alto custo, refugo excessivo e alto custo com controle de qualidade.

A adoção dos conceitos de tecnologia de grupo permite produzir pequenos lotes e ganhar vantagens econômicas semelhantes às obtidas com produção em massa não perdendo a flexibilidade da produção por processo.

De um exemplo de Groover, 2001, é ilustrado na Figura 3.1 duas peças idênticas geometricamente, (a) e (b), mas que requerem diferentes processos de usinagem devido às diferentes quantidades, tolerâncias e tipo de material requerido. Em (c) é mostrado uma família de peças com processos similares, mas diferentes atributos de desenho, todas as peças são torneadas, mas apenas algumas requerem furação e/ou fresamento.

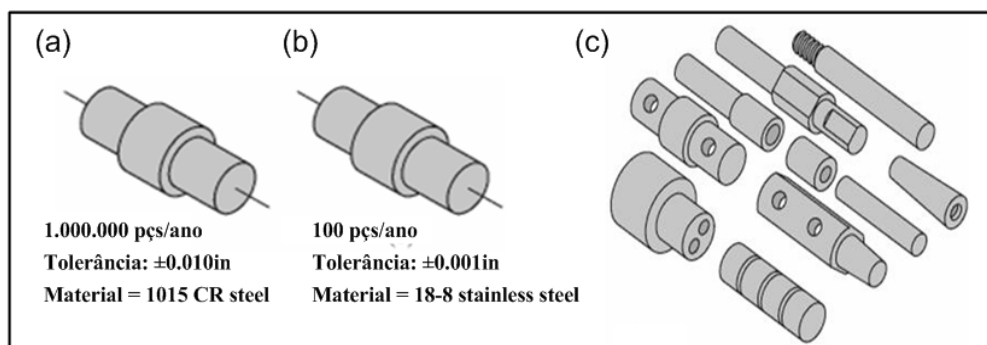


Figura 3.1 - Família de peças

Groover, 2001; Lorini, 1993 e Burbidge, 1979, citam vários benefícios que a tecnologia de grupo traz para uma companhia:

- promove padronização de ferramentas, fixação e *setup*;
- transporte de material é reduzido porque peças são movidas dentro da célula;
- planejamento do processo e programação da produção são simplificados;
- controle mais eficiente do projeto do produto;
- simplificação do sistema de fluxo de material;
- reduz quantidade de estoque em processo (estoques intermediários);
- reduz tempo de *setup*, resultando em diminuição dos prazos de entrega;
- satisfação dos trabalhadores aumenta quando estes colaboram na célula;
- melhor acesso e precisão das informações;
- significativa economia de custos de produção;
- qualidade do trabalho é completo utilizando tecnologia de grupo.

Para Burbidge, 1996, o primeiro passo em planejamento de tecnologia de grupo é planejar a divisão das máquinas em grupos e das peças em famílias. Segundo Lorini, 1993, para a implantação dos princípios de tecnologia de grupo, toda uma reorganização do ambiente de manufatura faz-se necessária. As principais etapas que devem ser consideradas neste processo podem ser citadas como:

- adequação do layout existente;
- implantação de um sistema de codificação e classificação;
- racionalização de projetos e processos de fabricação;
- formação de famílias de peças e células de máquinas.

Para a formação de famílias de peças e células de máquinas, inúmeros algoritmos de agrupamento têm sido desenvolvidos e aplicados. Estes algoritmos têm se utilizado cada vez mais de novos parâmetros e técnicas de aperfeiçoamento e racionalização. Em função das mais diversas metodologias utilizadas, os algoritmos podem fornecer resultados muito diferentes, mesmo sobre uma mesma massa de dados. Estes resultados são sempre uma combinação de metodologias associadas a diferentes critérios e limitações, implicando em um maior grau de processamento ou complexidade de análise decisória. Os algoritmos são ferramentas fundamentais na definição das famílias e células, permitindo então se beneficiar

de todas as vantagens já citadas do Layout de Grupo. A Figura 3.2 ilustra um exemplo de agrupamentos obtidos segundo Lorini, 1993, onde um grupo de máquinas (Célula 1) é especificado para produzir determinadas peças (Família 1).

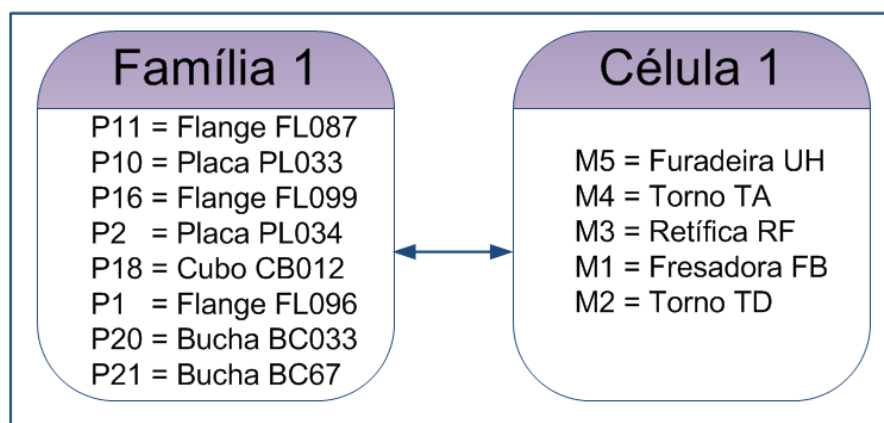


Figura 3.2 - Exemplo de Agrupamento gerado por um algoritmo

Um exemplo recente de utilização de tecnologia de grupo está no trabalho realizado por Durmusoglu e Nomak, 2005, onde um projeto de manufatura celular foi implementado em uma indústria que fabrica moldes para copos, a *Camis Machine and Mould Industry, Inc.* O projeto e sua implantação foram desenvolvidos ao longo de um período de dezoito meses e melhorias significativas ocorreram neste sistema de manufatura. Todas as etapas do projeto, as dificuldades encontradas, as estratégias e as melhorias de desempenho após a implementação de produção celular são abordados em detalhes neste trabalho.

3.1 Evolução do Sistema de Manufatura Celular

Segundo Drolet *et al.*, 1996, sistemas de manufatura celular clássicos são resultados da aplicação da tecnologia de grupo desenvolvida pelo russo Mitrofanov nos anos quarenta. Somente nos anos setenta é que os Estados Unidos começaram a adotar este conceito. A literatura relata centenas de histórias de sucesso que resultaram da utilização do sistema de manufatura celular clássica. No entanto, em alguns casos a manufatura celular tem dado resultados menos eficientes, que podem ser melhorados utilizando conceitos que serão abordados a seguir. Por exemplo, em um layout celular, a proximidade das estações de trabalho, seu número limitado e a similaridade dos produtos facilitam o trabalho, no entanto, quando muda o *mix* de peças, o sistema de manufatura celular clássico tende a se tornar menos eficiente.

3.1.1 Manufatura Celular Virtual

O conceito de célula virtual foi introduzido por McLean et al. *apud* Drolet *et al.*, 1996, no início dos anos 80. De acordo com a definição de McLean, uma célula virtual não é identificável como um agrupamento físico fixo de estações de trabalho, mas como arquivos de dados e processos em um controlador, ou seja, pode ser dito que uma célula virtual é um agrupamento lógico de recursos dentro de um controlador. Quando uma ordem de serviço necessitar de uma configuração de estações de trabalho, um controlador de células virtuais assume o controle destas e torna possível a comunicação entre as que fazem parte de um agrupamento de estações disponíveis ou de uma célula virtual.

Um caminho que permite manter sob controle e, especialmente, explorar esta organização celular virtual para atingir níveis altos de desempenho em termos de produtividade, do tempo de fluxo do pedido de serviço, do inventário em processo, e da flexibilidade em face de um ambiente rápido, volátil e variável, é proposto por Drolet *et al.*, 1996. Para exemplificar, considere-se a ilustração da Figura 3.3 que inclui 18 estações de trabalho na fábrica, cada uma delas classificada em um dos quatro tipos de estações. Neste exemplo, o sistema tem três células virtuais ativas e nenhuma estação compartilhada. Desta forma, as células virtuais contêm somente as estações necessárias e a capacidade extra requerida em um sistema celular clássico não é mais necessária em um sistema de manufatura celular virtual, também chamado de VCMS – *Virtual Cellular Manufacturing System*.

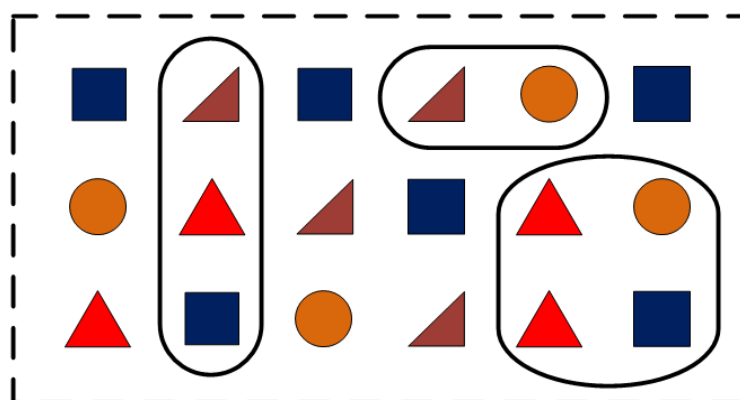


Figura 3.3 - Layout de um sistema de manufatura com uma Célula Virtual

Um VCMS crescerá naturalmente com aumentos de demanda. Ao contrário dos layouts de processos e de produto, a eficiência de um VCMS pode, às vezes, aumentar com o tamanho das instalações. Quando a instalação cresce, aumenta o número de rotas alternativas, como

resultado, a densidade de cada célula virtual (por exemplo, proximidade de máquinas e de estações de trabalho dentro de uma célula virtual) pode tender a aumentar. Por causa da descontinuidade física e do aspecto dinâmico da configuração da célula virtual, é aceito que a imprevisibilidade da demanda e mudanças na variedade de produtos não venha a afetar significativamente a eficiência nem a operação de um VCMS [Drolet *et al.*, 1996].

O conceito de células virtuais requer sistemas de transporte de material flexíveis, que podem ser sistemas dirigidos por operadores ou serem automáticos. Estes sistemas flexíveis automáticos são os AGV - *Automated Guided Vehicle* – Veículo Guiado Automaticamente, controlados por rádio ou raios infravermelho e os transportadores com micro-chaves, sensores de proximidade, leitores de código de barra e sistemas de visão, todos controlados por um ou mais sistemas de controle programável hospedados em computadores [Drolet *et al.*, 1996].

Babu *et al.*, 2000, desenvolveram um sistema de manufatura celular virtual para SMEs - *Small and Medium Enterprises* – pequenas e médias empresas. Os autores afirmam que mesmo muitas indústrias ao redor do mundo adotando o Sistema de Manufatura Celular, e comprovando seus benefícios para desenvolver a produtividade, na Índia as SMEs não estavam entusiasmadas pela tecnologia de grupo, principalmente pelo risco envolvido em adotar uma solução que necessita converter fisicamente o sistema atual em um sistema baseado em células. No entanto, o conceito de células virtuais traz uma promessa de boa aceitação pelas SMEs, pois seus benefícios são usufruídos sem a necessidade da mudança física dos equipamentos.

3.1.2 Manufatura Celular Dinâmica

A configuração física do sistema de manufatura celular dinâmico é propensa a mudar no tempo, visando minimizar o custo marginal total de manipulação de materiais (peças e máquinas) considerado em certo horizonte de tempo. Acredita-se que um Sistema de Manufatura Celular Dinâmico seja mais eficiente em ambientes turbulentos que em uma configuração *Job-Shop* clássica ou em um sistema de manufatura celular clássico [Drolet *et al.*, 1996].

3.2 Projeto do Layout Celular - Considerações

Segundo Lorini, 1993, a escolha de um ambiente celular para a fabricação é adequada predominantemente para sistemas de produção de grande variedade de peças, em volumes que não justifiquem investimentos em equipamentos dedicados, por serem pequenos ou médios os lotes. Após a análise do sistema de produção, um projeto do layout celular deve ser realizado tendo como principal objetivo, no planejamento deste, a otimização e a formação de famílias de peças e grupos de máquinas. Como principais parâmetros de projeto pode-se considerar:

- roteiros de fabricação;
- lista de materiais;
- lista de máquinas, capacidade, tempos;
- demanda para o sistema;
- habilidades da mão-de-obra.

Como etapas básicas para o projeto devem-se considerar algumas atividades como:

1. Estabelecer critérios para agrupar itens e formar famílias de produtos por similaridade, fluxo de processo, forma geométrica, categoria de máquinas ou classe de produto;
2. Definir metodologia para formação de agrupamentos:
 - codificação e classificação;
 - algoritmos baseados em Análise de Fluxo de Produção;
 - outros métodos;
3. Definir forma de fluxo ou carta de fluxo;
4. Dimensionar balanceamento das cargas de máquina:
 - tamanhos de lote;
 - demanda;
 - tempos de processo;
5. Adequar famílias a grupo de máquinas, estabelecendo critérios de corte e restrições de fabricação.

3.3 Restrições no projeto da célula

Segundo Lorini, 1993, na aplicação de um algoritmo sobre as informações de rotas das peças, alguns parâmetros de projeto podem ser estabelecidos como restrições para a criação das famílias e células, destacando-se: o tamanho da célula, o carregamento das máquinas, interdependência de máquinas e o balanceamento das células.

3.3.1 O tamanho da célula

Medido pelo número de processos ou máquinas alocadas na mesma. Na aplicação de um algoritmo de agrupamento para definição de células, serve como ponto de corte para o processo matemático ou heurístico de iteração. É um parâmetro que deve ser controlado por várias razões, entre as quais podem ser citadas como as mais importantes:

- limitação do espaço físico disponível;
- tipo de sistema de movimentação desejado;
- tamanho dos lotes de fabricação;
- número de operadores integrados a cada célula, para que estes possam acompanhar o seqüenciamento e ter uma visão adequada do conjunto, facilitando a supervisão.

3.3.2 Carregamento das máquinas

O planejamento operacional de uma célula implica na análise de dois enfoques: o carregamento e a programação das máquinas em estudo. A busca de uma solução otimizada simultaneamente para os dois aspectos é um tanto complexa, principalmente em um período de planejamento de curto prazo. Para facilitar a busca de uma solução, normalmente procura-se resolver os dois aspectos separadamente. Uma vez estando o problema do carregamento definido, a programação fica condicionada a atender, de forma mais adequada, o equacionamento estabelecido.

Devem ser conhecidos os tempos de processo das peças e estabelecidos limites para o carregamento de cada máquina, para fins de alocação destes tempos de processo das peças durante a definição das famílias. O limite de carregamento de cada máquina deve considerar as características específicas que definem a capacidade média de utilização da mesma no intervalo considerado. O somatório dos tempos de processo de todas as peças de determinada família deve ser mantido em níveis no máximo iguais ao limite definido para cada máquina correspondente. Considerando-se todas as peças de uma família com seus respectivos tempos

de processo, alocados em uma determinada máquina, o somatório destes tempos deve ser compatível com a capacidade de processamento daquela máquina, para um período de tempo definido e suas características operacionais.

3.3.3 Interdependência de máquinas

Na definição de grupos de máquinas, pode-se desejar manter agregadas, algumas delas, em uma mesma célula. Esta consideração deve ser observada devido a uma interdependência estabelecida por características tecnológicas, físicas, ou por outra razão estratégica. Mesmo o aproveitamento de equipamentos complementares existentes pode impor o vínculo, entre outras justificativas, como aquelas relativas ao porte, à precisão, às compatibilidades de tecnologias como comandos CNC, etc. Uma vez definida a máquina para uma célula, aquelas outras que mantiverem alguma dependência deverão, automaticamente, constar naquele agrupamento, evidentemente para atender a processos compatíveis e necessários.

3.3.4 Balanceamento das células

O processo de formação de famílias fornece duas informações básicas para o projeto das células de manufatura: a relação dos componentes que serão processados em cada célula, bem como das máquinas alocadas para realizar o processamento destes componentes, sem considerar aspectos operacionais. O balanceamento do fluxo das operações entre as diversas máquinas de uma célula deve procurar a maximização no aproveitamento da capacidade instalada. Em fase de projeto da célula, deve-se buscar em primeiro plano atender a carga de processo. O problema de balanceamento, no sentido de evitar máquinas ociosas ou sobrecarregadas, deve ser equacionado com adequado Planejamento e Programação da Produção.

3.4 Técnicas de Formação de Células

Segundo Selim *et al.*, 1998, muitos pesquisadores propuseram classificar os métodos de formação de células. A classificação proposta pelos autores é baseada no tipo de metodologia utilizada na solução geral, mostrada na Figura 3.4 e explicada nas subseções que se seguem.

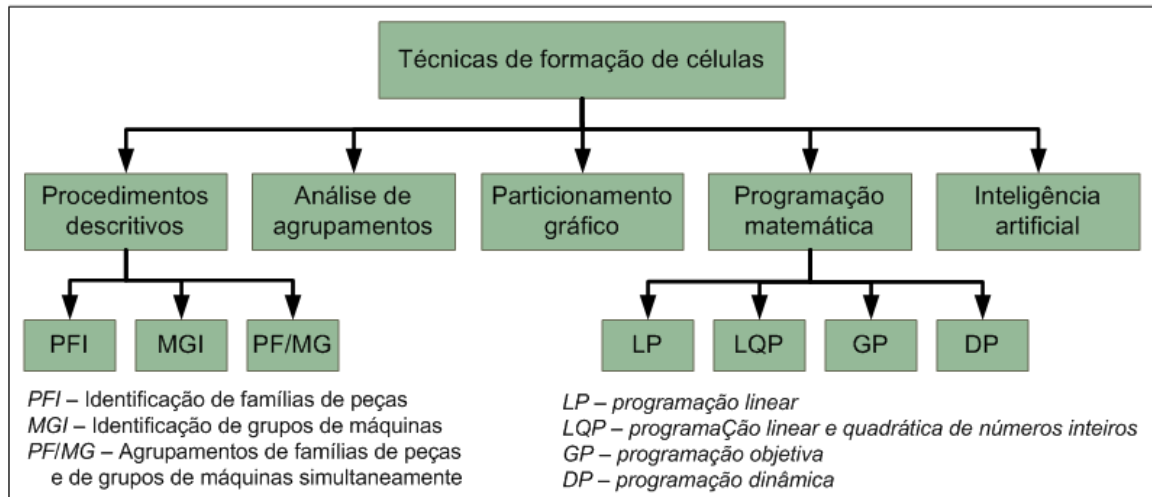


Figura 3.4 - Técnicas de Formação de Células

3.4.1 Procedimentos Descritivos

Em geral, procedimentos descritivos podem ser classificados em três classes: PFI, MGI e PF/MG.

a) PFI - *Part Family Identification* - Identificação de Famílias de Peças

Neste procedimento o processo de formação da célula começa identificando a família de peças e alocando máquinas para a família. Os métodos de identificação de famílias de peças podem ser ainda classificados como aqueles baseados em sistemas informais (investigação visual) e aqueles baseados em codificação formal e sistemas de classificação.

Segundo Lorini, 1993, a inspeção visual consiste em agrupar as peças apenas pela análise visual de suas características. É um método muito simples e de menor custo para definir agrupamentos, mas também é o menos eficiente, aplicável somente em situações especiais. Um especialista é exigido para executar inspeções, determinar as famílias de peças e associar grupos de máquinas.

O método de identificação utilizando codificação é uma metodologia para formação de um código numérico ou alfanumérico com a finalidade de representar características de um objeto ou processo, normalmente denominado como SCC - Sistemas de Codificação e Classificação. Nesta técnica, a estrutura de um sistema de codificação pode seguir uma concepção do tipo: cadeia, hierárquico ou híbrido. Embora o esquema hierárquico normalmente contenha mais informações que os outros, ele também agrupa as peças de uma maneira minuciosa, tendendo a ser mais complicado. Segundo Groover, 2001; Amantino, 2005 e Lorini, 1993, o método de classificação e codificação é o que consome mais tempo e é

um método complicado devido à exigência de uma pesquisa completa na população de peças. Para essa finalidade diversos sistemas de codificação foram desenvolvidos, entre os principais estão: *Opitz Classification System* (sistema não proprietário, desenvolvido por H. Opitz, na Universidade de Aachen, Alemanha); o *Brisch System* (*Brisch-Birn, Inc*); o *CODE* (*Manufacturing Data Systems, Inc*); o *MultiClass* (OIR – Organização para Pesquisa Industrial, EUA); o *DCLASS* (*Design and Classification Information System*, desenvolvido na *Brigham Young University*); o *MICLASS* (*Metal Institute Classification System*, desenvolvido pela TNO – *The Netherlands Organization for Applied Scientific Research*, Holanda); o *KK-3* (desenvolvido pela JSPMI – Sociedade Japonesa para a Produção de Máquinas Industriais) e o *SCC/GRUCON* (desenvolvido pelo Grupo de Pesquisas e Treinamento em Comando Numérico e Automatização Industrial na Universidade Federal de Santa Catarina).

b) *MGI - Machine Groups Identification* - Identificação de Grupos de Máquinas

Neste procedimento o problema é dividido em dois estágios: o primeiro é de análise, onde as máquinas são agrupadas com base em informações disponíveis nas rotas das peças, e o segundo, onde as peças são alocadas nos grupos de máquinas.

c) *PF/MG - Part Families/Machine Grouping* - Família de Peças/Grupo de Máquinas

Este procedimento identifica a família de peças e o grupo de máquinas simultaneamente. Burbidge propôs um dos primeiros procedimentos descritivos para o problema de formação de célula que é referido como *PFA - Production Flow Analysis* - Análise do Fluxo de Produção [Burbidge *apud* Selim *et al.*, 1998]. Segundo Lorini, 1993, o trabalho de Burbidge tem uma grande importância pelo seu caráter pioneiro, onde estabeleceu a conceituação da representação da matriz peça-máquina, avaliando o fluxo e a seqüência de produção, base de desenvolvimento da grande maioria dos sistemas de agrupamento existentes. A similaridade é identificada por coincidências de processos (rotas de produção), onde a definição de família de peças e grupo de máquinas para o projeto de células é baseada nas semelhanças do fluxo de processo para a manufatura.

Originalmente a matriz peça-máquina era chamada de *PFA Chart*, posteriormente passou a ser identificada como matriz de incidência máquina-peça [Groover, 2001]. O método de representação utilizado é uma tabulação das informações de fluxo na forma matricial, peça-processo em linhas-colunas, conforme mostrado na Figura 3.5, onde a identificação das

correspondências verificadas pode ser representada por critério de descrição convencional, como por exemplo, símbolos gráficos(*, x, !, etc.), zeros e uns (“0”, “1”) ou mesmo tempos respectivos dos processos.

		Peças					
		p_1	p_2	p_3	p_4	p_n
Máquinas	m_1	1	1		1		
	m_2			1	1		
	m_3	1	1		1		1
	m_4		1	1			
	...						
	m_n	1		1			1

Figura 3.5 - Representação de uma matriz de incidência Máquina-Peça

Várias técnicas foram desenvolvidas para facilitar a permutação das colunas e linhas para formar uma matriz diagonalizada, onde as células de máquinas e famílias de peças podem ser identificadas através de diferentes abordagens.

3.4.2 Análise de Agrupamentos

Esta abordagem considera diversas técnicas de reorganização dos dados obtidos normalmente na análise de fluxo de produção. O principal objetivo desta ferramenta estatística é agrupar de modo idêntico objetos ou entidades ou seus atributos dentro de grupos (*clusters*) de modo que os elementos individuais dentro de um grupo tenham um alto grau de “associação natural” entre eles e que não haja “associação natural” entre os grupos. Procedimentos de agrupamento podem ser classificados como: técnicas de agrupamento baseadas em arranjos, técnicas de agrupamento hierárquicas e técnicas de agrupamento não hierárquicas (técnicas heurísticas) [Selim *et al.*, 1998].

3.4.2.1 Técnica Baseada em Arranjos

Nessa metodologia, os processos necessários aos componentes nas máquinas são representados na forma de matriz de incidência, cuja identificação dos elementos (a_{ij}) pode ser formada por zeros (0) e uns (1). Uma entrada “1” em uma linha i e coluna j ($a_{ij} = 1$) da matriz

indica que a peça j tem uma operação na máquina i , enquanto que um 0 indica que não tem. As técnicas baseadas em arranjos tentam alocar máquinas a grupos e associar peças às famílias pelo rearranjo apropriado na disposição das linhas e das colunas para encontrar uma forma diagonalizada em blocos de $a_{ij}=1$ na matriz peça-máquina. Os zeros podem não ser apresentados na matriz de incidência para maior clareza.

Um dos algoritmos mais conhecido com esse propósito, de agrupamento baseado em arranjos, é o ROC - *Rank Order Clustering* [King, 1980; Groover, 2001], embora a literatura cite muitos outros, também bem conhecidos, citados a seguir.

- BEA - *Bond Energy Analysis* de McCormick et al. [Selim *et al.*, 1998; Lorini, 1993; Chan *et al.*, 1999; Singh e Rajamani, 1996];
- ROC2 - *Rank Order Clustering 2* [King e Nakornchai, 1982];
- MODROC - *Modified Rank Order Clustering* de Chandrasekharan e Rajagopalan [Selim *et al.*, 1998; Lorini, 1993; Singh e Rajamani, 1996];
- DCA - *Direct Clustering Analysis* de Chan e Milner [Selim *et al.*, 1998; Singh e Rajamani, 1996];
- CIA - *Cluster Identification Algorithm* e *Modified CIA* de Kusiak e Chow [Singh e Rajamani, 1996];
- CNA - *Close Neighbour Algorithm* [Boe e Cheng, 1991].

Considerado um dos mais importantes, o método ROC, desenvolvido por King, 1980, é um algoritmo que tem como objetivo a formação de células através de manipulações na matriz binária de incidência. O método converte cada linha da matriz em um número decimal, como se a linha fosse um número escrito em base binária; em seguida ordena as linhas em ordem decrescente do valor decimal de cima para baixo; o próximo passo é ordenar as colunas em ordem decrescente da esquerda para a direita também pelo respectivo valor decimal. O procedimento deve ser repetido até que resultem linhas e colunas totalmente ordenadas, ou seja, a matriz não pode ser mais modificada.

A matriz analisada por King, 1980, é mostrada na Figura 3.6, onde pode-se notar a matriz de incidência Peça-Máquina representada. Como primeiro passo do algoritmo deve-se transformar cada linha em valor decimal, conforme exemplo a seguir para a máquina 01:

$$\text{Binário}(001010) \rightarrow \text{Decimal} = (0 \times 2^5) + (0 \times 2^4) + (1 \times 2^3) + (0 \times 2^2) + (1 \times 2^1) + (0 \times 2^0) = 10$$

		Peças						Decimal	
		1	2	3	4	5	6	Equiv.	Ordem
Máquinas	01			1		1		10	5
	02		1	1				24	4
	03	1			1			36	2
	04		1	1		1		26	3
	05	1			1		1	37	1
	06								

Figura 3.6 - Matriz de Incidência Peça-Máquina: Primeira Iteração

Após todas as linhas transformadas verifica-se a ordem e organiza-se uma nova matriz onde agora as colunas terão seus valores transformados em decimal e verificado a ordem, conforme Figura 3.7.

		Peças						Decimal	
		1	2	3	4	5	6	Equiv.	Ordem
Máquinas	05	1			1		1	24	16
	03	1			1			6	7
	04		1	1			1	24	15
	02		1	1				6	3
	01				1		1	15	16
	06								

Figura 3.7 - Matriz de Incidência Peça-Máquina: Segunda Iteração

Logo após identificar a ordem das colunas então se monta a uma nova matriz com as colunas reordenadas, conforme Figura 3.8. Verifica-se se as linhas e colunas estão totalmente reordenadas; caso afirmativo, chega-se a definição do agrupamento.

		Peças						Decimal	
		1	4	6	3	2	5	Equiv.	Ordem
Máquinas	05	1	1	1				56	1
	03	1	1					48	2
	04				1	1	1	7	3
	02				1	1		6	4
	01				1		1	5	5
	06								

Figura 3.8 - Solução utilizando ROC

Neste exemplo foram formados dois grupos de máquinas e peças, conforme a seguir:

- Família 1 (peças 1 – 4 – 6) para a célula 1 (máquinas 5 – 3);
- Família 2 (peças 3 – 2 – 5) para a célula 2 (máquinas 4 – 2 – 1).

Este algoritmo foi posteriormente aperfeiçoado por King e Nakornchai, 1982, com a versão ROC2.

3.4.2.2 Agrupamento Hierárquico

Segundo Lorini, 1993, estas técnicas englobam as metodologias que consideram a similaridade ou dissimilaridade entre as máquinas em relação a sua utilização nas peças a serem processadas. A similaridade entre duas máquinas pode ser expressa como a capacidade de processamento de um conjunto de peças que necessitam de ambas as máquinas.

3.4.2.3 Técnicas Heurísticas

Um algoritmo heurístico baseia-se em procedimentos não classificatórios ou de utilização de coeficientes de similaridade, mas, de modo geral, em algum critério estabelecido como gerador de agrupamentos, via determinados procedimentos heurísticos. Um destes algoritmos, apresentado por Kusiak *apud* Lorini, 1993 estabelece a definição dos agrupamentos, partindo de determinada linha de uma matriz peça-máquina. Nesta linha, que identifica uma máquina, é admitido que todos os elementos não nulos por ela cruzados são potenciais elementos de uma família de peças. Alguns outros critérios heurísticos são considerados em paralelo à metodologia básica para estabelecer restrições operacionais. Critérios como hipóteses geradoras de grupos na busca de resultados associados a condições de contorno particulares podem ser utilizados, como por exemplo, a hipótese de definir uma linha ou coluna geradora do grupo, buscar todas as peças ou máquinas associadas, destacar associados até atender condições de contorno ou repetir o processo com dados restantes da matriz para novos grupos.

3.4.3 Particionamento Gráfico

Os métodos de particionamento gráfico tratam as máquinas e/ou peças como vértices e o processamento das peças com arcos/linhas conectando estes nós. Estes modelos ajudam na obtenção de subgráficos desconectados dos gráficos máquina-máquina ou dos gráficos peça-máquina para identificar células de manufatura [Selim *et al.*, 1998].

De acordo com Singh e Rajamani, 1996, uma matriz máquina-peça pode também ser representada com uma formulação de grafo. Dependendo da representação de nós e linhas três tipos diferentes de grafos podem ser usados: grafos bipartidos, grafos de transição e grafos de fronteira.

Nos grafos bipartidos, um conjunto de nós representam as máquinas e um outro conjunto representam as peças. Existe uma ligação entre uma máquina e uma peça, se a peça é processada na máquina, conforme mostrado na Figura 3.9 (a). Neste tipo de grafo, pode-se identificar simultaneamente famílias de peças e grupos de máquinas através da partição sucessiva do grafo original em subgrafos. O objetivo deste modelo é determinar o conector que, eliminado, possibilite dividir o grafo em dois subgrafos. Na Figura 3.9 (b) foi eliminado o conector da peça 3 com a máquina 1 e dois subgrafos foram identificados.

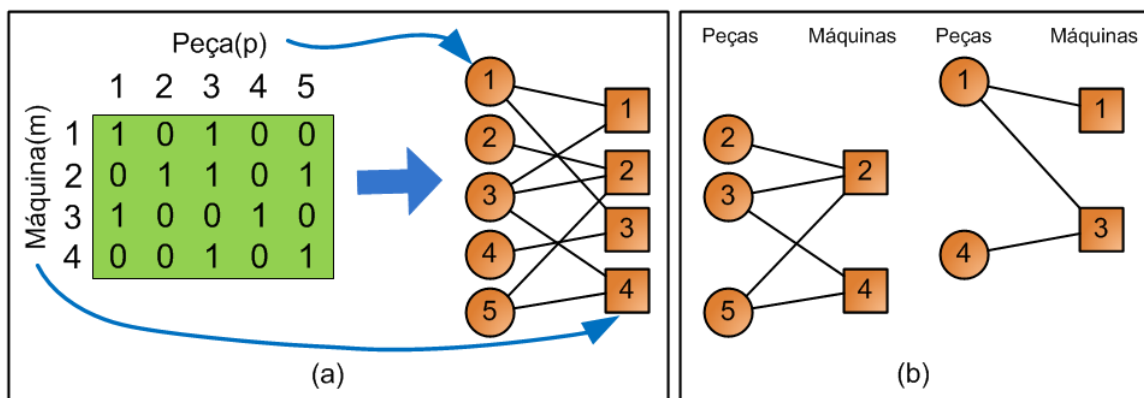


Figura 3.9 - (a) Grafo bipartido (b) Dois subgrafos

Nos grafos de transição uma peça (ou máquina) é representada por um nó e a máquina (ou peça) ou o relacionamento entre as máquinas (ou peças) é representado por um conector, conforme mostrado na Figura 3.10 (a). Este tipo de grafo é útil para detectar peças/máquinas que constituem estrangulamentos (gargalos).

Os grafos de fronteira consistem numa hierarquia de grafos bipartidos. Em cada nível do grafo de fronteira, os nós do grafo bipartido podem representar máquinas ou peças, conforme mostrado na Figura 3.10 (b). Tal como o tipo anterior, este tipo de grafo também pode ser aplicado para determinar peças/máquinas que constituem estrangulamentos. A determinação da peça ou da máquina gargalo em um grafo é uma tarefa complexa. Entretanto, são vários os autores que tentam resolver estes problemas utilizando esta técnica.

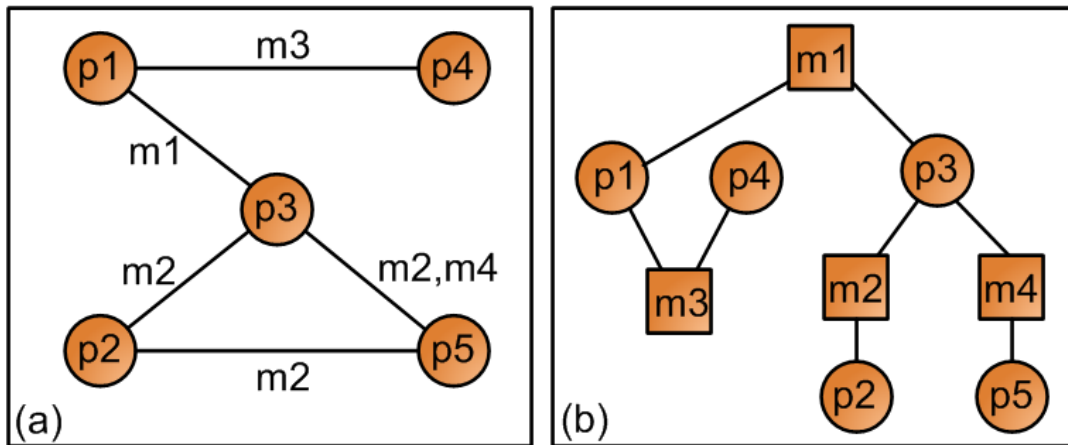


Figura 3.10 - (a) Grafo de transição (b) Grafo fronteira

Alves, 2007, e Singh e Rajamani, 1996, citam alguns pesquisadores que utilizaram a técnica dos grafos em seus modelos, sendo eles Rajagopalan e Batra, 1975; Song e Hitomi, 1992; Irani *et al.*, 1993 e Kumar, Kusiak e Kumar, 1986; Vohra *et al.*, 1990.

3.4.4 Programação Matemática

Segundo Amantino, 2005, os métodos de programação matemática buscam formar famílias a partir da definição de funções objetivo e da formulação de restrições ao atingimento destas funções. Exemplos de funções objetivo encontradas na literatura são a maximização dos coeficientes de similaridade, minimização de custos de investimentos, e movimentações e minimização dos tempos atravessamento. Lorini, 1993, ainda cita que estes algoritmos geralmente possuem objetivos muito específicos na análise dos resultados e buscam sempre encontrar soluções otimizadas.

Selim *et al.*, 1998, citam vários exemplos de objetivos de modelos como o de minimizar o número, custo ou distância de movimentos intercelulares, custo de oportunidade, custo de máquinas duplicadas, custo de alocação de máquinas, desbalanceamento de capacidade intercelular, capacidade de utilização, custos totais de operação e custo e tempo de *setup*.

Ainda conforme Selim *et al.*, 1998, os métodos de programação matemática podem ser classificados em quatro grupos principais baseados no tipo de formulação:

1. LP - Linear Programming - Programação Linear: a programação linear baseada nos métodos de formação celular como proposta por Purcheck, 1975 e Olivia-Lopez e Purcheck, 1979. Essencialmente aplicam a técnica agrupamento combinatório e programação linear ao problema de formação celular;

2. LQP - Linear and Quadratic Integer Programming - Programação linear e quadrática de números inteiros: estes modelos são propostos por Ballakur, 1985; Kumar et al., 1986; Kusiak, 1987; Kusiak e Heragu, 1987; Choobineh, 1988; Elzinga et al., 1989; Kasilingam e Bhole, 1990; Vakharia et al., 1989; Vakharia e Kaku, 1993; Wei e Gaither, 1990 e Boctor, 1991;
3. DP - Dynamic Programming - Programação Dinâmica: estes métodos foram desenvolvidos por Ballakur, 1985;
4. GP - Goal Programming - Programação Objetiva: os modelos de programação objetiva foram propostos por Sankaran e Shafer, 1990 e Rogers, 1991.

Recentemente outros autores também se utilizaram de programação matemática para desenvolvimento de agrupamentos celulares, onde pode-se citar Wilhelm *et al.*, 1998; Panchalavarapu e Chankong, 2005; Tsai e Lee, 2006; Süer *et al.*, 2009.

3.4.5 Técnicas de Inteligência Artificial

De acordo com Singh e Rajamani, 1996, o problema de formação das células é um problema de otimização combinatorial. Os algoritmos de otimização conduzem a uma solução ótima global possivelmente num longo tempo de computação, razão pela qual são propostas heurísticas para soluções aproximadas num tempo computacional aceitável e incluem já alguma perícia e aprendizado. No entanto, estes têm algumas limitações como serem sensíveis à solução inicial, à propensão de formação de grupos na matriz de incidência e à especificação do número de células, entre outras. Tornaram-se necessários então outros métodos e técnicas que, recorrendo à perícia e conhecimento, o utilizem na forma de aprendizagem, continuando a fazê-lo num tempo computacional menor do que utilizando os algoritmos de otimização.

Segundo Alves, 2007, os métodos utilizados na abordagem da Inteligência Artificial recorrem assim ao paradigma da aprendizagem e sendo na sua maioria técnicas de pesquisa local, fazem uma pesquisa da vizinhança. A vizinhança de uma solução é um conjunto de soluções que podem ser atingidas a partir desta solução por uma operação simples. Tal operação pode ser a remoção ou a adição de um objeto a uma solução. A troca de dois objetos numa solução é outro exemplo de tal operação (objeto neste contexto pode ser uma peça ou máquina). Em uma pesquisa local de vizinhança, o processo começa com uma solução (sub-ótima) a um problema particular e procura uma vizinhança definida desta solução para tentar encontrar uma melhor. Tendo encontrado uma, o processo reinicia-se com esta nova solução.

Continua iterativamente desta forma até que nenhum melhoramento seja encontrado. Esta solução final não sendo a solução ótima é, atendendo à sua vizinhança, a ótima local.

Segundo Singh e Rajamani, 1996 e Alves, 2007 as técnicas mais conhecidas de Inteligência Artificial são: AG - Algoritmos Genéticos, RN - Redes Neurais, SA - *Simulated Annealing*, TS - *Tabu Search*, *Target Analysis*, RP - Reconhecimento de Padrões, MF - Modelos *Fuzzy*, FC - *Fuzzy Clustering* e SAD - Sistemas de Apoio a Decisão. Algoritmos genéticos e de redes neurais são inspirados nos princípios derivados das ciências biológicas. *Simulated annealing* deriva da ciência física. *Tabu search* e *target analysis* é proveniente dos princípios gerais de resolução de problemas de inteligência. Estes procedimentos são algoritmos de pesquisa randômica e são aplicáveis amplamente para a maioria dos problemas de otimização combinatória. Das técnicas citadas, são detalhadas aquelas mais aplicadas.

3.4.5.1 GA - *Genetic Algorithm* - Algoritmo Genético

Conforme Jain e Martin, 1998, o algoritmo genético foi desenvolvido por Jonh Holand em 1975 e seu conceito foi baseado no princípio de seleção natural e sobrevivência dos indivíduos baseado na obra de Charles Darwin, onde os indivíduos mais fortes da população têm uma maior chance de sobreviver. Os algoritmos genéticos foram popularizados por Goldberg, 1989, que define algoritmo genético como um método genérico adaptativo de busca que imita o processo de evolução natural através da combinação da sobrevivência dos mais aptos entre estruturas de *strings* como uma troca estruturada, ainda que aleatória, de informações. Jonh Holand e seus colegas da universidade de Michigan, ao criarem o algoritmo genético, tinham o objetivo de abstrair o processo adaptativo do sistema natural e desenhar *softwares* com sistemas artificiais que retivesse o importante mecanismo do sistema natural.

Segundo Goldberg, 1989, as principais características de um algoritmo genético são:

- trabalha com codificação do conjunto de parâmetros em um *string*;
- realiza busca a partir de uma população de pontos (possíveis soluções), e não de um ponto único;
- usa informação da função objetivo (função de aptidão) para efetuar busca por melhores soluções;
- usa regras de transição probabilísticas (escolha aleatória) para guiar a busca em regiões do espaço com maior chance de melhoria.

Segundo Singh e Rajamani, 1996, um algoritmo genético é uma técnica inspirada no processo da evolução natural pela implementação de uma estratégia de “sobrevivência do mais adaptável”, daí serem também chamados de algoritmos evolucionários. Na evolução o problema que cada espécie enfrenta é o de procurar adaptações benéficas a um ambiente complicado e em mudança. O conhecimento que cada espécie adquire é embutido nos cromossomos dos seus membros. O desenho de um GA depende de seis conceitos chave: representação, inicialização, função de avaliação, reprodução, cruzamento e mutação. Em um GA simples, uma solução candidata é representada por uma seqüência de genes ou números binários e chama-se cromossomo. O potencial do cromossomo como solução é determinada pela função de adequabilidade que avalia o cromossomo relativamente à função objetivo do problema de otimização.

Conforme Argoud, 2007, existem diversas formas de codificação ou representação do cromossomo. A codificação deve ser capaz de conter todas as possíveis soluções do problema. As formas mais comuns encontradas na literatura para representar o problema de projeto de arranjo físico é o Grupo-Número. A codificação grupo-número é uma das mais usadas em problemas de projeto de arranjo físico. Os genes do cromossomo representam os objetos a serem agrupados e o valor do gene indica o subconjunto ao qual o objeto pertence. Exemplos:

- Célula-Máquina

Seja o cromossomo célula-máquina: (3 3 3 1 3 2 2 1).

Este cromossomo possui 8 genes, que representam 8 máquinas a serem agrupadas. O primeiro gene representa a máquina M1, o segundo gene a máquina M2, e assim por diante. O valor do gene indica a célula a qual a máquina está designada. Dessa forma, neste exemplo, a célula 1 é composta pelas máquinas M4 e M8, a célula 2 pelas máquinas M6 e M7, e a célula 3 por M1, M2, M3 e M5, conforme mostrado esquematicamente na Figura 3.11.

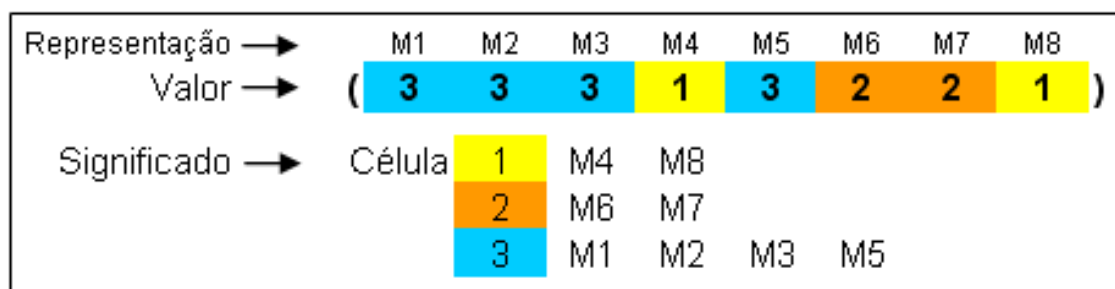


Figura 3.11 - Representação cromossomo célula máquina

- Grupo-número com separador

Nesta codificação a primeira parte do cromossomo refere-se às máquinas, e a segunda parte às peças. Seja o cromossomo: (2 1 2 1 3 2 2 3 3 1).

Este cromossomo representa a Célula 1: Máquinas M2 M4, Peça P5; a Célula 2: Máquinas M1 M3, Peças P1 P2; e a Célula 3: Máquinas M5, Peças P3 P4. A Figura 3.12 mostra tal representação.

Representação →	M1	M2	M3	M4	M5	P1	P2	P3	P4	P5
Valor →	(2	1	2	1	3	2	2	3	3	1)
Significado →	Célula	1	M2	M4	P5					
		2	M1	M3	P1	P2				
		3	M5	P3	P4					

Figura 3.12 - Representação cromossomo grupo-número

Adaptado de Singh e Rajamani, 1996, o algoritmo é apresentado de forma bem simplificada em 6 passos:

- passo 1 - Inicialização: seleciona-se os parâmetros iniciais e cria-se uma população diversificada inicial;
- passo 2 - Reprodução: reproduz-se *strings* usando amostras estocásticas sem substituição;
- passo 3 - Recombinação: aplica-se o operador de recombinação para formar uma combinação selecionada da população;
- passo 4 - Substituição: compara-se os cromossomos classificados e seleciona-se a melhor combinação usando as regras de substituição;
- passo 5 - Diversificação: aplica-se mutação para diversificar a população;
- passo 6 - Nova Geração: avalia-se a nova geração. Caso a nova população represente a melhor solução: Fim; caso contrário, vai-se para o passo 2.

Os principais parâmetros de um algoritmo genético cujos valores devem ser definidos pelo usuário são: tamanho da população, taxa de aplicação dos operadores genéticos e valor do critério de parada.

Segundo Argoud, 2007 a forma mais comum de geração da população inicial é a geração aleatória ou uma população bem adaptada (semente). A população inicial também pode ser gerada uniformemente, com pontos igualmente espaçados no espaço de busca. Outra

forma é gerar a primeira metade da população aleatoriamente e o restante da população a partir da primeira metade, pela troca dos valores dos *bits* dos cromossomos. Também há a geração chamada *seeding*, esta é uma geração tendenciosa para regiões promissoras do espaço de busca, que consiste em colocar na população inicial soluções encontradas por outros métodos de otimização.

O processo de seleção refere-se à escolha dos indivíduos (cromossomos pais) que irão gerar descendentes (cromossomos filhos) através dos operadores de cruzamento e mutação. Os métodos de seleção comumente usados são pela Roleta, por Ranking e por Torneio.

Segundo Goldberg, 1989 *apud* Singh e Rajamani, 1996 os indivíduos com um maior valor de adaptabilidade são selecionados para cruzamento e mutação usando um processo de seleção de amostragem estocástica sem substituição. Os cromossomos a serem cruzados e os pontos de cruzamento são selecionados aleatoriamente.

Em um algoritmo genético, o papel da função de aptidão é atribuir uma nota a cada cromossomo e assim avaliar a qualidade da solução. A função de aptidão também é usada para selecionar os cromossomos para reprodução, ou seja, cromossomos mais aptos têm maior chance de passar o material genético para as próximas gerações.

O critério de parada refere-se ao momento em que se deve parar o processo de evolução do algoritmo genético e adotar o cromossomo com maior aptidão como a melhor solução. Os critérios comumente usados são número de gerações, perda da diversidade e convergência.

A função de avaliação ou adaptabilidade é calculada para cada individual na população e o objetivo é encontrar um individual com um valor máximo. O objetivo do problema da formação das células é minimizar a soma pesada de elementos vazios e excepcionais

Venugopol e Narendran, 1992 *apud* Argoud, 2007 foram uns dos primeiros autores a aplicarem algoritmos genéticos ao projeto de arranjo físico, propondo um AG para o problema de agrupamento peça-máquina com múltiplos objetivos, ou como também é conhecido, problema de formação de células de manufatura. A função objetivo contemplava a minimização do volume de movimento intercelular e a minimização da variação da carga de trabalho dentro da célula, sendo o tamanho da célula e a designação única de máquinas às células restrições do problema. Como os objetivos eram conflitantes, não existia uma única solução ótima para o problema e tentou-se alcançar uma solução satisfatória, ou seja, quando não existe outra solução que possa melhorar um objetivo sem detrimento ao outro objetivo. Os autores apresentaram um exemplo numérico de 30 peças e 15 máquinas e o melhor cromossomo gerou um agrupamento de três células de manufatura. Este estudo considerou

vários aspectos reais como tempo de processamento para cada peça em diferentes máquinas, demanda de cada peça e carga de trabalho nas máquinas. Os resultados mostraram um conjunto de soluções satisfatórias, que permitem ao projetista a escolha da melhor alternativa.

Morad e Zalzal, 1996, desenvolveram um algoritmo genético aplicável aos problemas de formação de células de manufatura e programação da produção.

Chan *et al.*, 2006, propõem um AG para resolver modelos matemáticos que descrevem características de MPPG - *Machine-Part Grouping Problem* – Problemas de Agrupamento de Peça-Máquina e de CLP - *Cell Layout Problem* – Problema de Layout Celular. O objetivo para o MPPG é minimizar os movimentos intracelulares e para o CLP é minimizar as distâncias de viagem intracelulares.

Gonçalves Filho e Tiberti, 2006, apresentaram um novo GA para projetos de layout celular. Ele é baseado na codificação de grupos em vez de codificação de máquinas simples, geralmente usada pela maioria das implementações de GA encontradas na literatura, e novos mecanismos e operadores de mutação foram propostos. Testes utilizando dados publicados mostraram que o algoritmo proposto pode encontrar a estrutura do grupo presentes nos conjuntos de dados, mas como qualquer algoritmo GA, sendo uma heurística, é necessário executar o algoritmo várias vezes para ter certeza se a melhor solução foi encontrada. O aumento do número de máquinas e/ou o número de células exige mais gerações para a convergência; contudo, uma vez que se está agrupando máquinas, o número de peças não tem efeito sobre o tamanho do espaço de tomada de solução, tornando o algoritmo atrativo para problemas onde o número de peças é grande.

Hicks, 2004; Hu *et al.*, 2007; James *et al.*, 2007; Wu *et al.*, 2007 e Tariq *et al.*, 2009 foram outros autores que trabalharam recentemente com algoritmos genéticos para resolução de problemas relativos a formação celular.

3.4.5.2 Redes Neurais (RN)

Os modelos de redes neurais imitam a forma como os neurônios do cérebro humano podem gerar decisões inteligentes. De acordo com Alves, 2007, as redes neurais têm a capacidade de aprenderem com a experiência e se adaptarem a novas situações. Originalmente aplicadas em áreas como reconhecimento de padrões, otimização combinatória, robótica e controle de processos, estenderam-se a área de projeto e produção, particularmente, a área de formação das células por Wang, 1993. Continuando a ser aplicada por Venugopal, 1998, este

classificou as redes neurais aplicadas à formação das células de acordo com o tipo de entrada, o modo de aprendizagem e o tipo de modelos usados. Os tipos de entradas requeridos podem ser os requisitos de processamento das peças ou a dimensão, forma e características de projeto das peças. O tipo de aprendizagem pode ser supervisionada ou não supervisionada. Aprendizagem supervisionada requer a comparação do valor de entrada com um valor objetivo que representa a saída desejada, assim, os pesos vão sendo alterados iterativamente na base dos erros entre as saídas atuais e as saídas desejadas. Na aprendizagem não supervisionada não existe nenhum valor objetivo pelo que inerente a esta aprendizagem há um mecanismo que reconhece e captura padrões (similaridades) nos valores de entrada e vai criando classes representadas por um valor exemplar. Os modelos das RNs podem classificar novas peças (máquinas) a grupos existentes sem ter que considerar o conjunto total dos dados tornando-os capazes de manusear grandes conjuntos de dados. Têm a capacidade de aprender padrões complexos e generalizar rapidamente a informação aprendida e ainda a capacidade de trabalhar com informação incompleta.

Aplicações de redes neurais para problemas de formação de células são propostas por Rao e GU e Karapathi e Suresh *apud* Selim *et al.*, 1998 e Pandian e Mahapatra, 2009.

3.4.5.3 *Simulated Annealing* (SA)

Os algoritmos de *Simulated Annealing* são baseados no modelo de Monte Carlo usado para estudar a relação entre a estrutura atômica, a entropia e a temperatura durante o arrefecimento dos metais. Esta técnica simula o processo de arrefecimento de um sistema físico até este atingir um estado de energia mínima. Os passos principais para obter os agrupamentos são: obtenção de solução inicial, geração de soluções de vizinhança, aceitação ou rejeição da solução gerada e término [Singh e Rajamani, 1996].

Segundo Alves, 2007, em primeiro lugar é especificado o número máximo de células. Uma relação de máquinas iniciais às células é gerada usando uma regra predefinida, como por exemplo, inicialmente cada máquina pode ser atribuída a uma célula específica ou as máquinas poderiam ser atribuídos a células aleatoriamente. Em cada iteração, a geração de soluções é conseguida movendo uma máquina (escolha aleatória) da corrente célula para uma outra célula (escolha aleatória), formando uma nova relação de máquinas. As peças são alocadas a esta nova relação e o valor objetivo é calculado. A solução gerada é aceita se o valor da função objetivo melhorar. Se isto não acontecer a solução é aceita com uma

probabilidade dependente do valor da temperatura (parâmetro) que é preparado para aceitação de uma grande proporção de soluções geradas no princípio. Em seguida este valor é alterado para reduzir a probabilidade de aceitação. Em cada temperatura muitos movimentos são tentados até que as condições predefinidas são encontradas. Encerra-se quando se chega ao máximo de iterações especificadas ou a taxa de aceitação está abaixo de um determinado valor.

3.4.5.4 *Tabu Search* (TS) – Busca Tabu

Este método de otimização matemática é uma função heurística que realiza uma busca na vizinhança da solução atual. Uma heurística é uma regra, uma simplificação ou uma aproximação que reduz ou limita a busca por soluções em domínios que são difíceis e pouco compreendidos. Desta forma, a partir de uma solução vigente, este método realiza uma pesquisa por soluções melhores na vizinhança desta solução, empregando-se as restrições contidas na Lista Tabu para impedir certos movimentos (ou soluções), até que se satisfaça um determinado critério de parada. Esta busca iterativa na vizinhança define como nova solução aquela com melhor valor da função objetivo. Caso não ocorram movimentos que melhorem a solução, em relação à solução vigente, a busca tabu realizará o movimento que degrada menos o valor da função objetivo. TS normalmente utiliza estruturas de memórias, onde ficam armazenados os últimos movimentos realizados, com a função de evitar que a busca fique presa em pontos de mínimo ou máximo local, provocando a realização de ciclos. Os movimentos armazenados na lista tabu ficam proibidos por um determinado número de iterações, sendo esse número normalmente relacionado com o número de movimentos possíveis a partir da nova solução vigente e pode ainda ser relacionada com o número total de iterações do algoritmo [Weller, 2008].

3.4.5.5 Modelos *Fuzzy* (MF)

Segundo Zeleznikow e Nolan, 2001, os modelos *fuzzy* baseiam-se na lógica difusa onde cada proposição, em vez de tomar um valor verdadeiro ou falso, tem uma probabilidade associada de ser verdade. Desta forma, operadores lógicos e teoria de probabilidades são combinadas para modelar raciocínio com incerteza. Venugopal (1998, 1999) *apud* Alves, 2007, classificou os modelos *fuzzy* aplicados à formação das células de acordo com o tipo de

entrada e suas abordagens. Os tipos de entradas requeridos podem ser os requisitos de processamento das peças ou sua dimensão, forma ou características de projeto das peças. Já as abordagens podem ser versões *fuzzy* dos métodos clássicos/convencionais (por exemplo: *fuzzy single linkage clustering* e programação matemática *fuzzy*) e versões *fuzzy* de métodos modernos/inteligentes (por exemplo: redes neurais *fuzzy* e sistemas periciais *fuzzy*).

Al-Ahmari, 2004, afirma que vários pesquisadores têm considerado conceitos e desenvolvido diferentes algoritmos *fuzzy*. Abordagens *fuzzy* têm sido usadas em várias áreas dos sistemas de manufatura, como análise de custos, desenvolvimento de produto, planejamento de locação e agregados, programação de produção, instalações de layout, tecnologia de grupo e sistemas de manufatura celular. Também tem servido para análises onde outros métodos, como o de análise de fluxo de produção, não são suficientes para concentrar todos os tipos de características de um conjunto de peças. Isto também é evidenciado em investigações de volume de dados muito grandes. Além disso, propôs uma abordagem de agrupamento *fuzzy* para selecionar características em aplicações de tecnologia de grupo para formar famílias de peças completas.

3.5 Análise das fronteiras da célula

Ordenada uma matriz peça-máquina, esta tende indicar na sua diagonal blocos de elementos correspondentes a um definido agrupamento obtido, que deve para fins práticos ser totalmente individualizado dentro da matriz. Assim, faz-se necessário identificar as fronteiras entre os blocos.

Segundo Amantino, 2005, a definição das fronteiras de cada célula normalmente é realizada por intervenção de um analista em fase posterior ao ordenamento decorrente da aplicação dos algoritmos sobre as matrizes de incidência. Porém, para viabilizar uma análise otimizada de um grande número de opções de rotas, é desejável que isto seja feito automaticamente.

Baker e Maropoulos, 1997, também afirmam que na maioria dos algoritmos de reordenação de matrizes, a análise das fronteiras das células é feita manualmente. Como parte do algoritmo *Black Box Clustering*, propõem um procedimento para determinar estas fronteiras, definição realizada pela identificação de cantos candidatos a limite da célula. Sua metodologia é dividida em três passos:

1. criar uma matriz inicial de candidato a canto de célula;
2. usar regras para identificar outros candidatos e eliminar cantos não desejados;
3. marcar e unir as células.

O passo “1” é mostrado esquematicamente na Figura 3.13, onde são registrados cadeias de agrupamentos verticais e horizontais, sendo que em suas intersecções formam-se candidatos a canto de célula, a fronteira da célula ocorre de um candidato até o próximo.

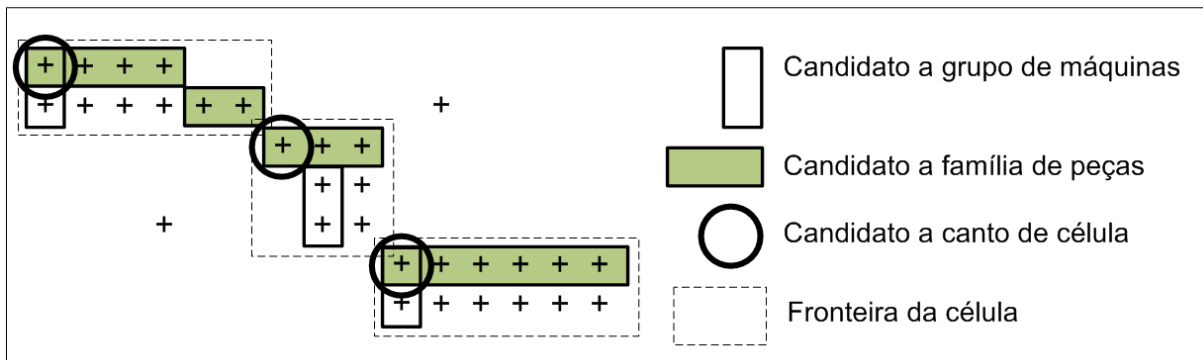


Figura 3.13 - Metodologia para definição de fronteira de célula

O passo “2” é utilizado para tratar e eliminar candidatos a canto de células que causem agrupamentos de máquinas unitárias ou uma única célula. O passo “3” tem a função de reduzir elementos excepcionais originadas de matrizes dispersas. Estes dois últimos passos são algoritmos bastante extensos e de complexa implementação computacional.

4 REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DE LAYOUT

Segundo Moore, 1970, os problemas de layout de plantas tem importância já no ano de 1795; isto é evidenciado em seu livro pelo desenho desta época de Thomas Ellicott para a construção de um moinho.

Em função da evolução dos sistemas produtivos e do aumento da complexidade dos arranjos físicos, houve o desenvolvimento de várias formas de representação, tanto dos arranjos físicos possíveis quanto de algumas das relações percebidas entre as áreas ou centros de produção. Para Muther, 1976 *apud* Torres, 2007, a importância assumida pelas representações é tal que se uma representação for inadequada pode dificultar a escolha entre as alternativas geradas. A necessidade dessas representações ocorre à medida que o arranjo físico passa a ser pensado como um conceito abstrato, em que há o abandono do posicionamento duvidoso de recursos e equipamentos diretamente no chão-de-fábrica, e se passa a considerar os posicionamentos relativos de todos os recursos, áreas e equipamentos entre si, visando uma melhor utilização da área disponível.

Conforme Torres, 2007, a precisão com que os objetos tinham que ser dispostos na fábrica também passou a ser representada, resultando em representações mais precisas e detalhadas. O tema do que deveria ser representado também se altera, passando de visões gerais da fábrica e equipamentos a representações detalhadas de seus componentes. É permitido pensar que tanto as tecnologias de transformação e manufatura quanto as de representação evoluíram, agregando novos elementos aos existentes anteriormente em um processo chamado por Usher, 1993 *apud* Torres, 2007, de “síntese cumulativa”. O aumento da precisão e do detalhamento dessas representações atingiu um grau que passou a permitir a construção de um novo equipamento ou até de uma nova fábrica a partir de representações, e não a partir de uma outra fábrica existente. Estas representações passam a demonstrar a preocupação com as regras, usos e costumes da atividade, à medida que passam a ser dirigidas à construtores fabris e de equipamentos.

Conforme Moore, 1970, a necessidade de plantas industriais mais detalhadas fez com que empresas se especializassem em desenho de layout, possibilitando o surgimento de técnicas de desenho com a representação de utilidades por meio de cores, para facilitar a visualização e padronizações de simbologia na criação e interpretação destas plantas, inclusive passando a utilizar gabaritos padronizados para auxiliar nos desenhos. Tompkins *et al.*, 1996, mostram que além das representações das plantas através de desenho em escala impresso em

papel podem-se utilizar modelos de cartolina, plástico, borracha magnética, fitas adesivas, etc. para representar um layout. Esta forma tem a vantagem de permitir ao usuário modificações e estudos mais rápidos, mas tem a desvantagem de não ser tão detalhado quando um desenho, principalmente em relação a visualização do dimensionamento.

Com a chegada do computador, Tompkins *et al.*, 1996, cita que este passou a ser utilizado também para representação de layout, e com esta nova ferramenta foi possível realizar desenhos com muito mais agilidade e precisão do que os realizados em prancheta. O desenho em computador permite que rapidamente se visualize várias vistas ao mesmo tempo e possibilita alterar a escala de forma fácil e rápida, tornando modificações e estudos bastante facilitados. Inicialmente utilizou-se para desenhos 2D, mas com a evolução dos *softwares* CAD passou-se a utilizá-lo também para representações 3D. Paralelamente, o computador passou a ser utilizado para auxiliar na tomada de decisão, pois algoritmos começaram a ser processados, simulações e animações realizadas para tornar mais confiáveis as decisões que se necessitavam tomar.

Anteriormente à utilização de computador para visualizações em 3D, outras formas foram utilizadas para representação tridimensional. Pemberton, 1977, afirma que no contexto do arranjo industrial existe a necessidade de se representar tridimensionalmente a planta nas situações em que seja necessário a apresentação do arranjo físico para explicar as novas condições de métodos ou para discutir com diretorias, onde os modelos, pelo seu apelo imediato, podem causar impacto mais rápido. O autor cita alguns métodos que foram ou são utilizados para a representação, como a utilização de modelos de madeira ou isopor, a representação em modelos de papelão e madeira e o de moldes ou modelos, onde a base é construída conforme a planta em estudo e os modelos metálicos ou de plástico são comprados no comércio, conforme Figura 4.1 de Pemberton, 1977 e Moore, 1970.

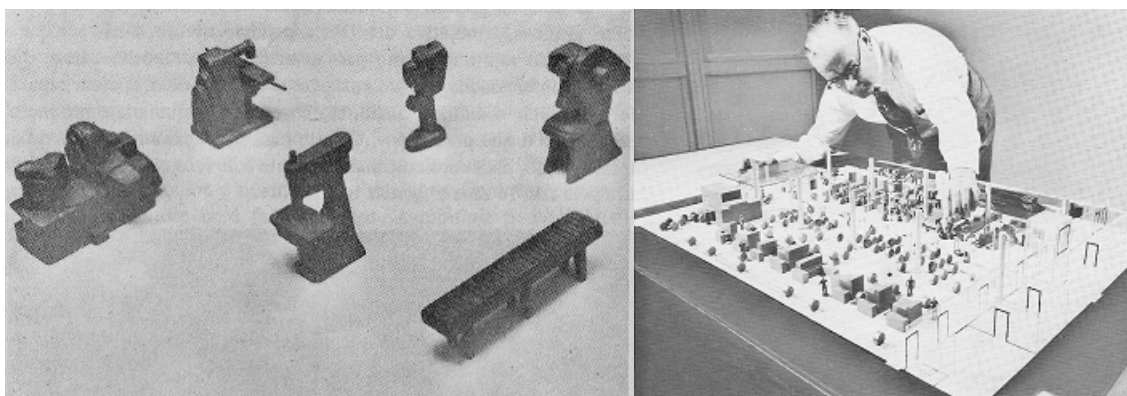


Figura 4.1 - Modelos de máquina em metal

Hoje em dia estes métodos apresentados para visualização tridimensional passam a ser cada vez menos utilizados e o computador assume um papel cada vez mais importante.

4.1 *Computer-Aided Layout* – Layout auxiliado por computador

Desde a década de 60, vários autores vêm propondo algoritmos e programas computacionais para auxiliar na análise e formação de arranjos físicos. Alguns deles são citados a seguir e representam apenas uma amostra dos inúmeros *softwares* encontrados na literatura, mas exemplificam a diversidade em suas aplicações.

Tompkins *et al.*, 1996, e Heragu, 2006, citam como sendo os primeiros programas apresentados na literatura para otimizar layouts o CRAFT, CORELAP e o BLOCPLAN. Tompkins *et al.*, 1996, ainda cita o MCRAF, MIP, LOGIC, MULTIPLE e o ALDEP. Basicamente eles trabalham com layouts tipo funcional (*job-shop*) e serviram de referência para o desenvolvimento de vários outros programas ao longo dos anos. Basicamente trabalham com layout de bloco, exceto poucos que trabalham com matrizes e SLP - *Systematic Layout Planning* - Planejamento Sistemático de Layout. Os que trabalham com blocos podem ser classificados em representação discreta ou contínua, conforme mostrado na Figura 4.2. Tomam como entrada de dados principal um diagrama de relacionamentos ou um diagrama de-para e adotam uma função objetivo baseada em custo ou distância para otimizar o arranjo físico, podendo ser utilizados tanto para a construção quanto para a melhoria de layouts de bloco.

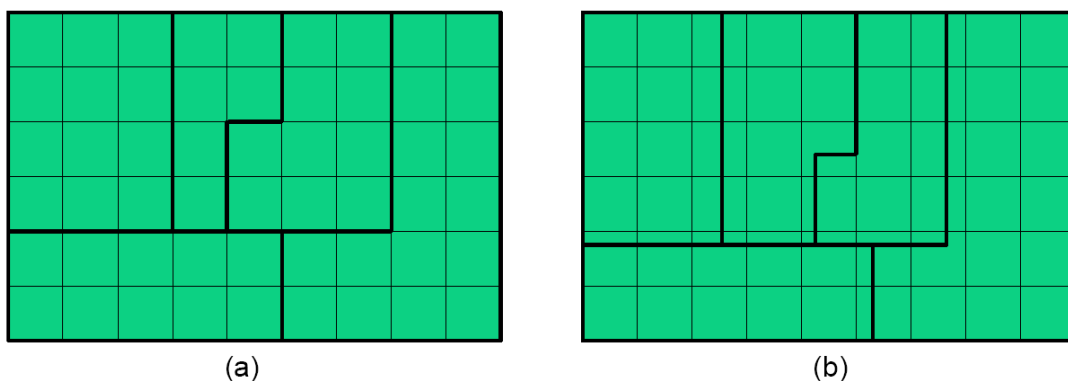


Figura 4.2 - Layout de Bloco tipo (a) Discreto e (b) Contínuo

O algoritmo CRAFT - *Computerized Relative Allocation of Facilities Technique* – Técnica para Alocação Relativa Computadorizada de Instalações, foi desenvolvido por Armour e Buffa em 1963. O processamento é iniciado baseado em um layout existente, realizando somente trocas dos setores que sejam adjacentes ou com a mesma área e não leva

em consideração o formato do setor. Uma vez determinado o layout inicial, o algoritmo calcula o centro de cada setor e armazena em uma matriz a distância dos centros multiplicada pelo custo unitário de cada par de setores. É considerada a possibilidade de trocar dois ou três setores ao mesmo tempo e verifica a melhor alternativa de alteração através da redução do custo total do layout a cada iteração do algoritmo. Encontrando o melhor custo, o algoritmo salva o novo layout e computa os novos valores. Este novo layout gerado serve de base para nova análise de otimização e assim sucessivamente até que seja encontrado um layout que todas as possíveis trocas não reduzam seu valor de custo total.

A Figura 4.3 ilustra um exemplo de utilização do CRAFT por Tompkins *et al.*, 1996.

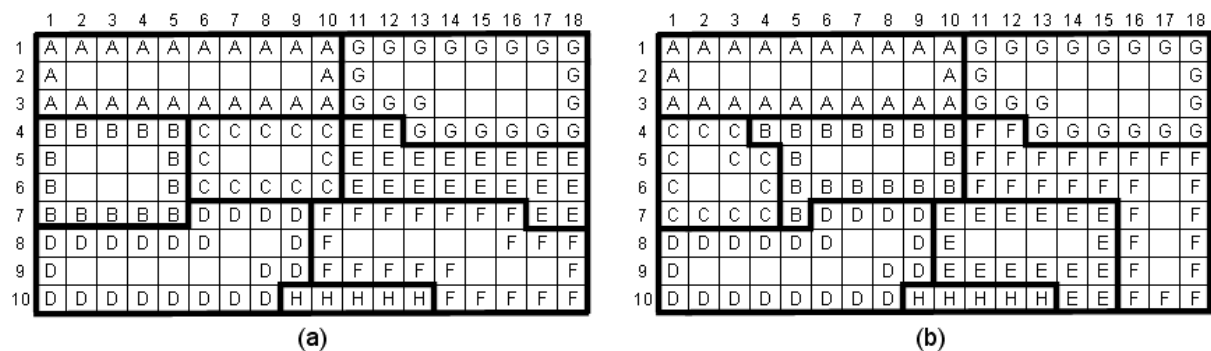


Figura 4.3 - (a) Layout CRAFT inicial (b) Layout CRAFT Final

O CORELAP - *COmputerized RELationship Layout Planning* - Planejamento Computadorizado de Layout Relacional foi desenvolvido por Lee & Moore em 1967. Utiliza as relações qualitativas da CRP - Carta de Relações Preferenciais para estabelecer a posição relativa dos departamentos, construindo assim uma solução. As entradas mínimas para o programa são a CRP, o número de departamentos e suas áreas e os pesos atribuídos às relações de proximidade. O processo se inicia com a atribuição de valores numéricos arbitrários às relações da CRP, com valores maiores sendo atribuídos às relações de maior importância ($A = 6$, $E = 5$, $I = 4$, $O = 3$, $U = 2$, $X = 1$). Ocorre então a soma dos valores correspondentes à totalidade de relações de cada departamento e a criação de uma lista decrescente desses valores (chamados de *Total Closeness Rating* – TCR). Depois da criação, o primeiro departamento da lista (que possui uma maior intensidade de relações) é posicionado no centro do arranjo. A seguir, posicionam-se os departamentos que possuam uma relação do tipo A com o primeiro departamento. Se nenhum for encontrado a mesma busca é refeita, desta vez por departamentos que possuam relações do tipo E e assim por diante, até as relações do tipo O. A partir daí, a seleção se dá através da TCR. Se encontrar mais de um departamento potencial para um dado tipo de relação, será escolhido aquele que possuir uma

soma de relações maior (estiver mais próximo do topo da lista criada anteriormente). A alocação de um departamento junto a outro depende da análise de diferentes formas e posições, procurando-se aumentar a área de contato entre as áreas vizinhas e as relações de proximidade. Este procedimento é executado repetidamente até que não haja mais departamentos a alocar. A solução gerada é determinística, ou seja, para cada conjunto de entrada há apenas solução.

O BLOCPLAN foi desenvolvido por Donaghey e Pire em 1991 e é baseado em faixas ou blocos. Os dados de entrada podem ser uma tabela de relacionamento ou uma tabela “de-para”, apresentando a relação dos setores e os custos de cada ligação. O algoritmo inicialmente divide a planta em faixas e acomoda os setores nas faixas observando uma das tabelas. Com os setores colocados nas faixas é feito o cálculo do custo de cada ligação, considerando a distância a ser percorrida entre cada setor, não somente os adjacentes, e assim é obtido o custo total do layout. O algoritmo a cada iteração busca trocar setores com o objetivo de diminuir o custo total do layout, quando não conseguir diminuir mais este valor total define-se o melhor layout.

Hassan, 1994, fez um estudo bastante completo, relacionando uma quantidade significativa de trabalhos realizados desde 1957 com os fatores e assuntos de projetos considerados. Fatores como tipo de layout, transporte de material, custo, tempos, flexibilidade de layout, fluxo de dados, área de máquinas e duplicação de máquinas foram considerados pelas diferentes publicações na literatura. Vários destes trabalhos são comparados em suas formulações, metodologias de solução e resultados computacionais. Tsai e Lee, 2006, também citam em seu trabalho todas as características que tem sido adotadas para o problema de formação de células, juntamente com vários trabalhos que utilizaram cada um deles.

Barbosa-Póvoa *et al.*, 2001, apresentaram um algoritmo utilizando programação linear para projeto de layout industrial genérico, onde soluções simultâneas de blocos e problema de layout detalhado são considerados. A planta de layout ótima é obtida baseada na minimização do custo de conectividade, que podem ser descritos como simples elementos de conexão, AGV ou transportadores. Em seguida Barbosa-Póvoa *et al.*, 2002, estenderam este algoritmo de representação 2D para representações 3D, mas continuaram trabalhando com soluções de blocos. Osman *et al.*, 2003, desenvolveram um sistema híbrido automático de planejamento de construção de layout, onde se utilizam de várias técnicas e ferramentas para desenvolver este sistema computacional, como o SLP, método dos blocos; algoritmo genético e AutoCAD®.

4.2 Sistemas Comerciais

Os primeiros desenvolvimentos de sistemas para utilização de computador auxiliando o layout foram realizados através de pesquisas em universidades. No entanto, alguns pacotes comerciais também surgiram ao longo do tempo. Segundo Tompkins *et al.*, 1996, a maioria destes pacotes comerciais tem a intenção de ser uma ferramenta de desenho eletrônico para facilitar o desenho ou manutenção de layout ou ser uma ferramenta de validação de layout.

Heragu, 2006, lista três *softwares* comerciais que operam apartir do AutoCAD[®] instalado no computador. São eles:

- *FactoryCad*: é um *software* que customiza o AutoCAD[®] e permite ao usuário desenvolver layout de novas fábricas ou modificar fábricas existentes. Ele não gera um layout como os outros *softwares* fazem. Entretanto, ele é uma ferramenta que permite ao usuário desenhar paredes, portas, janelas, colunas e linhas de utilidades. O usuário pode escolher desenhos de máquinas, sistemas de transporte de material ou *pallets* que estão na contidas em uma biblioteca e inserir com relativa facilidade no layout. Pode-se fazer algumas animações e calcular centro de áreas de trabalho.

- *FactoryPlan*: é uma ferramenta para executar análises qualitativas de layout, baseado em abordagem SLP. O pacote tem a função de planejar o layout, onde o usuário define o nome, o tipo e o espaço requerido por cada departamento. Em seguida define as relações entre os departamentos em um diagrama e manipula até obter um layout aperfeiçoado. O layout gerado é mostrado com várias linhas de espessura diferentes entre pares de departamentos. A espessura de cada linha corresponde a relação entre os correspondentes pares de departamento. Usando este *software* o usuário pode fazer uma análise visual do layout, fazer modificações e novas análises até obter o layout aperfeiçoado.

- *FactoryFlow*: é uma ferramenta de análise de layout. Integra desenhos de plantas reais e fluxos de materiais com dados da produção e de manuseio de materiais. O resultado são diagramas que mostram o caminho e a direção do fluxo assim como a frequência ou custo das viagens feitas através das rotas. Este *software* também requer a existência de um layout gerado pelo *software* AutoCAD[®]. É necessário cadastrar os produtos, quantidades, rotas e equipamentos de transporte de material. Depois da inserção dos dados são definidos os caminhos de fluxo. Para isto selecionam-se pontos de inserção à medida que o *FactoryFlow* pede a localização dos Centros de Produção nomeados nos seus arquivos de dados. Os caminhos podem ser gerados automaticamente. Em seguida, o *software* calcula a distância,

intensidade, custo e cria o diagrama de fluxo. Opcionalmente setas podem ser adicionadas às linhas para indicar a direção do fluxo. O diagrama de fluxos compostos do *FactoryFlow* calcula a soma dos fluxos entre centros de produção para os produtos selecionados. A capacidade deste diagrama mostra o custo total de manuseio de materiais ou a intensidade de fluxo entre centros de produção e é uma ajuda visual essencial para projetar ou reprojetar instalações. O *FactoryFlow* gera gráficos “de/para” em uma matriz de dados de intensidade de fluxo e distância entre centros de produção. Ele indica a intensidade total de fluxo “de” e “para” centros de produção, assim como a intensidade de fluxo entre um centro de produção e os demais. Os dados são codificados por cores de acordo com faixas especificadas pelo usuário para que os fluxos significantes sejam detectados. Deste modo, o *FactoryFlow* é usado como um pós-processador para validar layouts desenvolvidos anteriormente em outro tipo de *software* como o BLOCPLAN ou o CRAFT. Conforme o resultado obtido o usuário pode fazer mudanças e fazer uma nova análise para buscar melhores resultados. Tamshnas et al, 1990 *apud* Heragu, 2006 cita que a empresa *Deere & Company* utilizou este *software* para mostrar que um layout baseado em tecnologia de grupo teria uma redução de aproximadamente 30% na distância de transporte de materiais.

Heragu, 2006, cita ainda o Layout-iQ, que é um *software* para desenvolver layouts rapidamente, desenhando-os, avaliando os custos com tráfico e modificando o layout por tentativa e erro. Os dados de entrada podem ser manuais ou lidos de um banco de dados do Microsoft Access. As máquinas, equipamentos, etc. são representados esquematicamente e o objetivo é minimizar a distância ou a dependência relativa entre os dados modelados inicialmente. Outro *software* citado pelo autor é o VIP-PLANOPT (*Visually Interfaced Package of* PLANOPT), que é um *software* gráfico para layout de blocos.

Os softwares citados por Heragu, 2006, *FactoryCad* e *FactoryFlow*, e também por Tompkins *et al.*, 1996, a partir de 2007 passaram a fazer parte do portfólio de produtos da Siemens AG, pois esta tem feito várias compras de empresas que trabalham com softwares relacionados com PLM - *Product Lifecycle Management* - Gerenciamento do Ciclo de Vida do Produto, para ter a disposição dos usuários toda uma gama de softwares para todos os processos envolvidos no desenvolvimento, engenharia e manufatura de produtos. Exemplo de empresas compradas foi a *UG Corporation*, que por sua vez havia comprado a *Tecnomatix* e a *Engineering Animation, Inc.*, que foram empresas que desenvolveram estes softwares citados. Hoje a Siemens reuniu estes softwares no *Tecnomatix 9*, que é um pacote de softwares que trabalha com planejamento e validação de peças e montagem, robótica e

planejamento de automação, gerenciamento da qualidade, da produção e do processo de fabricação e design e otimização de fábricas, sendo que neste último segmento está incluído o Tecnomatix *FactoryCad* e o Tecnomatix *FactoryFlow*. Estes continuam no mesmo conceito explicado anteriormente, apenas com atualizações que permitem importar dados de ferramenta e produto (NX, JT, *SolidEdge*, *Parasolid*) e criar layout e planejar instalações em 3D [Siemens, 2009].

Softwares não específicos para representação gráfica também estão sendo utilizados para auxiliar o projeto de layout. Menegon *et al.*, 1997, concluíram que ferramentas oriundas da computação gráfica e simulação possibilitam a revelação de conflitos e auxiliam nas decisões coletivas. Entre estes softwares estão o ARENA da *Rockwell Automation*, o PROMODEL da *Promodel Corporation* e o AUTOMOD da *Applied Materials, Inc.*. Segundo Torres, 2007, estes programas computacionais de simulação utilizam formas de representação que não são totalmente adequadas para representar os elementos envolvidos no arranjo físico como, por exemplo, áreas de atividade e relações qualitativas. O Arena e o Promodel não possuem uma representação gráfica precisa. São utilizados ícones apenas para animação, conforme mostrado na Figura 4.4 (a) e Figura 4.4 (b). A manipulação de um arranjo físico no software é impossível, isto é, alterar a animação do modelo não tem nenhum efeito sobre os cálculos de desempenho. Além disso, as distâncias decorrentes de alterações do arranjo devem ser convertidas em tempo antes de serem introduzidas no programa. O Automod utiliza uma representação gráfica tridimensional com alto grau de precisão, Figura 4.4 (c), mas impede a modificação do arranjo físico no próprio software de forma direta. É preciso realizar uma série de operações no programa, como a passagem do modo de simulação para o modo de edição, para alterar o arranjo físico modelado no simulador.

Ainda segundo Torres, 2007, estes softwares ainda tem a limitação da falta de flexibilidade, pois permitem apenas a construção de modelos com os recursos programados pelo fabricante, dificultando a construção de métricas de desempenho dos arranjos nos simuladores. Mas por outro lado, a lógica que pode ser implementada nos simuladores permite a inclusão no modelo de capacidades como escolhas baseadas em probabilidade, ou em valores de variáveis do modelo, entre outras. Esse tipo de representação traz em si a capacidade de representar seqüências detalhadas de processo, assim como a ocorrência de fluxos intermitentes ou contínuos ao longo do tempo.

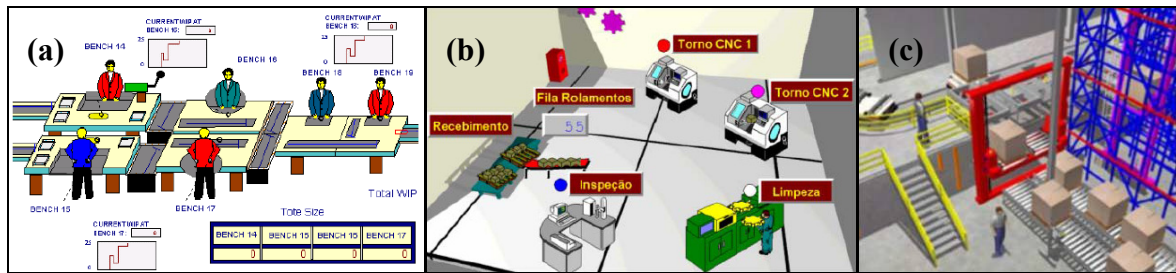


Figura 4.4 - Representação gráfica típica do (a)Arena (b)Promodel (c)Automod

4.3 Integração de Softwares

Segundo Torres, 2001, existem várias técnicas e ferramentas computacionais para se desenvolver arranjos físicos. Essas ferramentas podem ser apenas listas de verificação ou métodos organizados, como algoritmos otimizantes ou heurísticos. Três tipos de ferramentas computacionais têm sido mais aplicadas no desenvolvimento de projetos de plantas industriais:

- Ferramentas de Simulação de Sistemas de Eventos Discretos – Esses *softwares* vêm evoluindo desde a década de 1950 e são aplicados para a análise dos processos produtivos e da programação da produção, principalmente do desempenho deles. Com esse tipo de ferramenta pode-se analisar os efeitos dos processos ou da programação da produção sobre um layout e vice-versa;

- Ferramentas de Desenho Auxiliado por Computador - CAD – *Computer Aided Design*: Usadas para representar as plantas dos projetos e também para representação tridimensional para análise do projeto arquitetônico. Dada a sua difusão, hoje estão disponíveis vários *softwares* que adicionam funções específicas aos programas de CAD (*add-ins*), alguns específicos para o projeto do arranjo físico;

- Ferramentas de Simulação Humana – *Softwares* desenvolvidos para analisar o elemento humano em seu posto de trabalho, visando tornar os projetos desses postos mais adaptados ao homem, reduzindo os problemas de interação homem-espaco de trabalho.

No entanto, segundo Torres, 2001, nenhuma destas soluções estão completamente desenvolvidas e cada uma tem seus pontos fortes e suas limitações. Em seu trabalho ele faz a integração destes tipos de *softwares* (AutoCAD®, Jack®, AUTOMOD e ARENA), pois desta forma pode-se aproveitar o potencial de cada *software* melhor, como por exemplo, utilizando resultados de um *software* como entrada para os demais.

Vosniakos *et al.*, 1997 *apud* Tiberti, 2003 apresentam o projeto de um *software* que integra uma ferramenta CAD, usada para criar um modelo estático, a uma ferramenta de simulação inteligente que auxilia na construção e melhoria de arranjos físicos. Apesar de seu diferencial, o mesmo considera o arranjo físico em sua fase de detalhamento e necessita do apoio de outros *softwares* para efetuar as análises e gerar o arranjo físico.

Chawla e Banerjee, 2002, desenvolveram um método automático para reconstrução de instalações 3D a partir de layouts de bloco 2D que utilizam SFC – *Space Filling Curves* - Curvas de preenchimento espacial. Um processo iterativo é usado para adquirir conhecimento sobre o layout, e reorganizar a estrutura cenográfica com base no conhecimento adquirido, e formação de células dentro do layout. O método foi implementado em um ambiente de realidade virtual usando softwares como o *CAVE Virtual Reality Environment*, *CAVELIB*, *IRIS Performer* e o *Real Time Tracking*.

Sadeghpour *et al.*, 2006, utilizaram *Visual Basic for Applications* – VBA, AutoCAD® 2002 e Microsoft Access® para realizar um implemento computacional, onde o usuário define as restrições de uma planta industrial (coordenadas X,Y ou vizinhanças, por exemplo) e o sistema desenha automaticamente o layout em ambiente AutoCAD. Um módulo para análise de resultados também foi desenvolvido.

As ferramentas CAD não foram criadas com o objetivo principal de projetar layout, mas tem sido muito úteis no desenvolvimento destes. A maioria das ferramentas CAD tem a opção de desenhar em *layers*, que são camadas que podem ser sobrepostas para formar um projeto, podendo ser gerenciado quais ficam aparentes ou não, desta forma categorias de *layers* padrão para layout industrial foram criados, ficando separado no desenho informações relativos ao desenho da construção (portas, janelas, demolição, etc.), estruturas (colunas, plataformas, etc.), rede elétrica (transformadores, caixas, etc.), mecânica (água, compressor de ar, ventilação, tubulações, etc.) ou máquinas (equipamento do processo)[Sly, 1996, e Wilkins e Mckew, 2002].

4.4 *Computer Aided Cell Layout* – Layout Celular Auxiliado por Computador

Com a importância do tema layout celular, pesquisadores trabalharam no desenvolvimento de soluções específicas para o projeto de células de manufatura. De maneira geral são utilizadas integrações entre softwares e algoritmos genéricos adaptados às necessidades específicas deste tipo de arranjo físico.

Tahara, 2001 apresenta o SADCel, um trabalho que propõe uma arquitetura que busca integrar os diversos algoritmos de formação de célula, permitindo que estes sejam aplicados a um mesmo conjunto de dados. Sendo um sistema de apoio à decisão, ele define critérios associados aos algoritmos que podem ser selecionados a partir do método escolhido e de um conjunto de restrições estabelecidas pelo projetista. É dedicado a um único tipo de arranjo físico, o celular, possuindo inicialmente em sua biblioteca dois algoritmos, o ROC e um do tipo genético, que é disponibilizado ao projetista à medida que este necessita. As informações são armazenadas em um banco de dados, o que facilita sua localização e recuperação. Sua arquitetura foi construída para permitir fácil introdução de novos algoritmos e tipos de dados. Um dos pontos mais importantes deste sistema é permitir a utilização de vários algoritmos de maneira a fornecer ao usuário um conjunto de possíveis soluções, considerando diferentes cenários.

Luong et al., 2002 *apud* Tiberti, 2003 apresentam o projeto de um *software* para tomada de decisão na formação de células de manufatura que utiliza uma base de conhecimento para auxiliar o projetista na escolha do tipo de célula e em sua composição. Apesar de seu diferencial, ele implementa um método de análise e de formação específica para células de manufatura que necessitaria de diversas adaptações para funcionar com outro tipo de arranjo físico.

4.5 Proposta do Trabalho

No contexto de sistemas de planejamento de layout auxiliado por computador, este trabalho se propõe a desenvolver um software aplicativo, desenvolvido em *Visual Basic*, que viabilize a integração de rotinas de definição de agrupamentos de máquinas com representação automática em ambiente gráfico. O sistema requer módulos para customização do software gráfico SolidEdge®, de modo a associar informações de um banco de dados (Access) com resultados dos algoritmos de agrupamento, representando automaticamente os equipamentos associados em plataforma gráfica em diversas opções de planejamento de ambientes de layout celular.

5 SISTEMA APLICATIVO DESENVOLVIDO

Vários trabalhos têm sido desenvolvidos para realizarem definições de células, mas não sua representação gráfica. Para atingir este objetivo, um aplicativo foi desenvolvido com a função de gerar modelamentos 3D de células definidas conforme metodologia de tecnologia de grupo já amplamente estudada no meio acadêmico, não sendo objetivo deste trabalho propor novos métodos ou desenvolver um *software* para modelamento, mas agrupar e utilizar soluções já estudadas e aplicadas isoladamente.

A realização deste trabalho utiliza-se de plataforma de software de CAD, associada com aplicativo especialmente desenvolvido para sua interface com módulos de definição de células de manufatura baseados em fundamentos de tecnologia de grupo.

A Figura 5.1 apresenta um fluxograma com a visão geral da estrutura do sistema aplicativo desenvolvido, onde a partir de informações de peças e máquinas agrupadas através de algoritmo específico obtêm-se a representação tridimensional do layout celular.

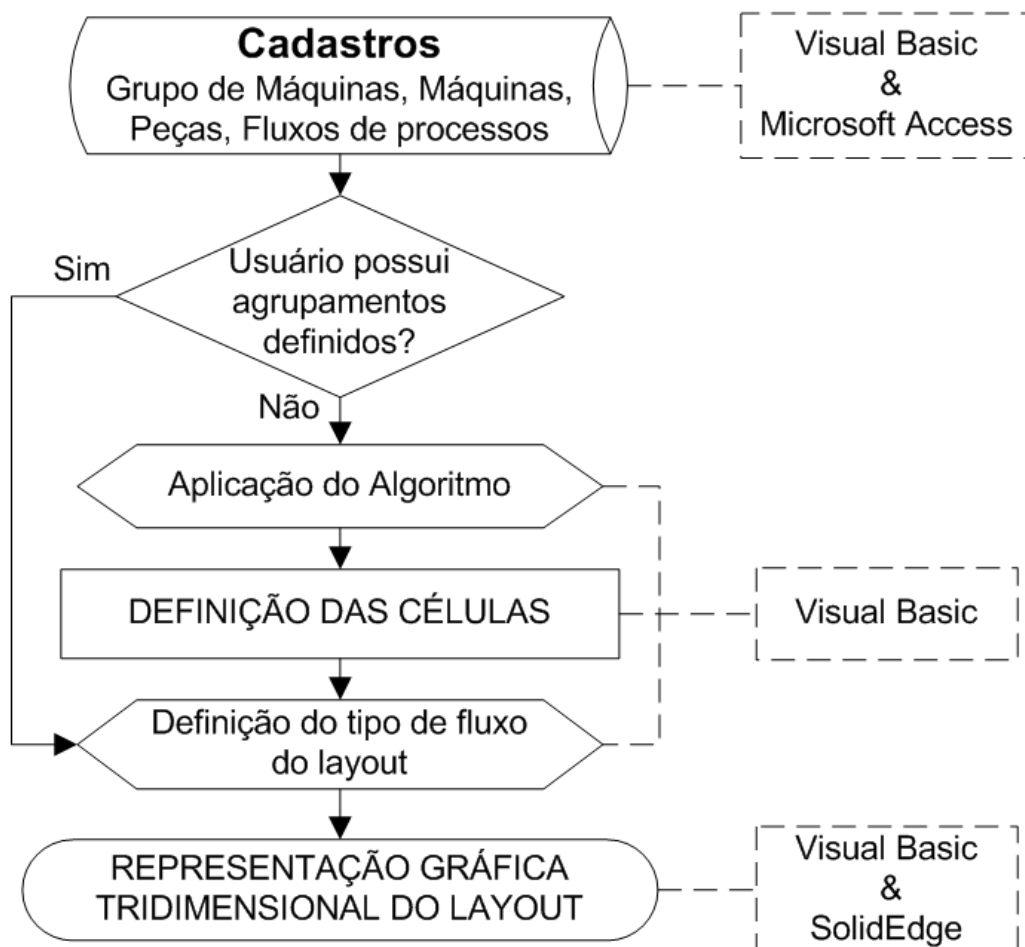


Figura 5.1 - Visão geral da estrutura do sistema

5.1 Softwares utilizados para desenvolvimento do aplicativo

Para a programação das interfaces do aplicativo utiliza-se a linguagem *Microsoft Visual Basic 6* pela sua compatibilidade com a maioria dos *softwares* CAD do mercado, especialmente com o Solid Edge®. Esta linguagem de programação permitiu automatizar e programar as macros no Solid Edge®, bem como desenvolver a interface gráfica e o algoritmo de tecnologia de grupo utilizado. O formato padrão Access® foi utilizado para o banco de dados, permitindo o registro de todas as informações necessárias para o funcionamento do sistema.

Ao criar as tabelas no banco de dados, definiu-se uma chave primária em cada tabela e em seguida criaram-se relacionamentos entre as mesmas. Um relacionamento garante a integridade dos dados e ajuda o aplicativo a associar os dados de qualquer consulta, formulário, ou relatório novos que incluam as duas tabelas relacionadas. Um banco de dados relacional requer dados duplicados entre tabelas (os dados que efetivarão as ligações), mas não permite dados duplicados dentro das tabelas. Um exemplo de relacionamento entre tabelas é mostrado na Figura 5.2, onde relaciona a peça cadastrada com seu processo e operações que esta peça exige para ser fabricada.

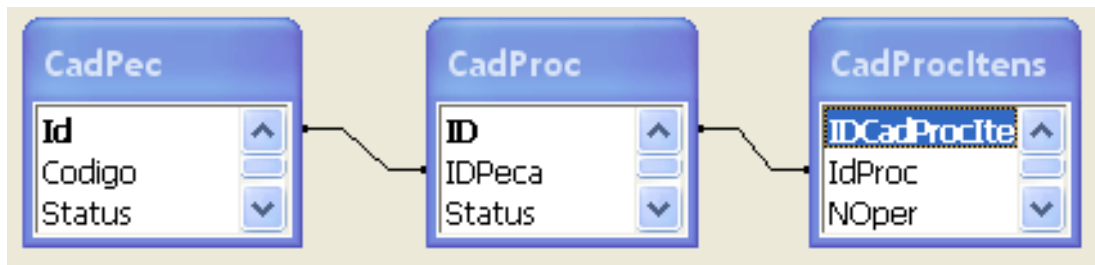


Figura 5.2 - Relacionamentos entre tabelas de dados

Na Figura 5.3 é mostrada a estrutura do banco de dados utilizada, para as tabelas criadas. No centro, é apresentada a tabela CadPec com cadastro das peças a serem fabricadas e na parte direita da figura visualiza-se a tabela CadProcltens, onde são registrados os processos que cada peça necessita em seu processo de fabricação.

Peças					Processos				
	Id	Codigo	Status	Descrição	IDCadProcltens	IdProc	NOper	Operacao	IdMag
	1	/P0001	Ativada	Pino Central		1	1	Tornear1	2
	2	/P0002	Desativada	Base Superior		1	2	Fresar1	4
	3	/P0003	Ativada	Eixo Ranhurado		2	1	Tornear2	10
	4	/P0004	Ativada	Engrenagem Principal		2	2	Fresar2	3
	5	/P0005	Desativada	Eixo Ranhurado		2	3	Serrar2	7
	6	/P0006	Ativada	Pino Extrator M12x120		3	1	Tornear3	12
	7	/P0007	Ativada	Base Inferior		3			

Figura 5.3 - O banco de dados e suas tabelas

Para acesso à base de dados usando o *Visual Basic* escolheu-se usar a tecnologia chamada de *ActiveX Data Objects* - ADO, que oferece objetos para acessar e manipular informações em um computador local ou servidor. Esta escolha foi em função de ser a tecnologia mais recente disponível e pensando em integrações futuras com outros softwares ou outro tipo de banco de dados.

5.2 Software utilizado para representação tridimensional

O *software* escolhido para representar em ambiente gráfico foi o *Solid Edge*®, que é um *software* 3D CAD de modelamento de sólidos com características parametrizáveis. Sua escolha justifica-se pois este é utilizado tanto em ambiente acadêmico como industrial, não é um *software high-end*, pois limitaria muito sua utilização em função de seu alto custo e tem bons recursos de modelamento e customização. Os recursos de customização permitem, através de linguagem de programação, automatizar tarefas e melhorar os comandos padrões conforme a necessidade, reduzindo o tempo necessário para realizar tarefas repetitiva.

Conforme Unigraphics, 2004, a partir da versão 15 do *Solid Edge*®, ele já pode ser utilizado com compatibilidade total com o *Visual Basic* 6 e, conseqüentemente neste aplicativo, embora tenha sido testado e comprovado nas versões 17, 18, 20 e ST.

5.3 Metodologia para geração das células

O algoritmo de agrupamento escolhido é do tipo Análise de Agrupamento por Técnica Baseada em Arranjos – ROC - *Rank Order Clustering*. Este foi escolhido por ser um dos mais estudados [Groover, 2001] e de fácil compreensão e implementação computacional [Amantino, 2005]. Como o objetivo principal do sistema proposto neste trabalho é a representação gráfica tridimensional e também possibilitar ao usuário importar agrupamentos gerados por outros algoritmos, a metodologia para geração de células não é objeto de investigação ou teste de performance dos seus resultados.

Para definição das fronteiras dos agrupamentos, ou seja, a limitação da célula utiliza-se neste trabalho uma metodologia que identifica os agrupamentos automaticamente. A maioria dos trabalhos realizados não contemplam rotinas automáticas para identificação dos agrupamentos, ficando geralmente a cargo do usuário esta identificação. Esta metodologia é apresentada no fluxograma da Figura 5.4 e funciona para um grande número de arranjos de matrizes testados. Entretanto, tem exceções como a que o sistema identifica somente um agrupamento, conforme será mencionado no capítulo de resultados deste trabalho.

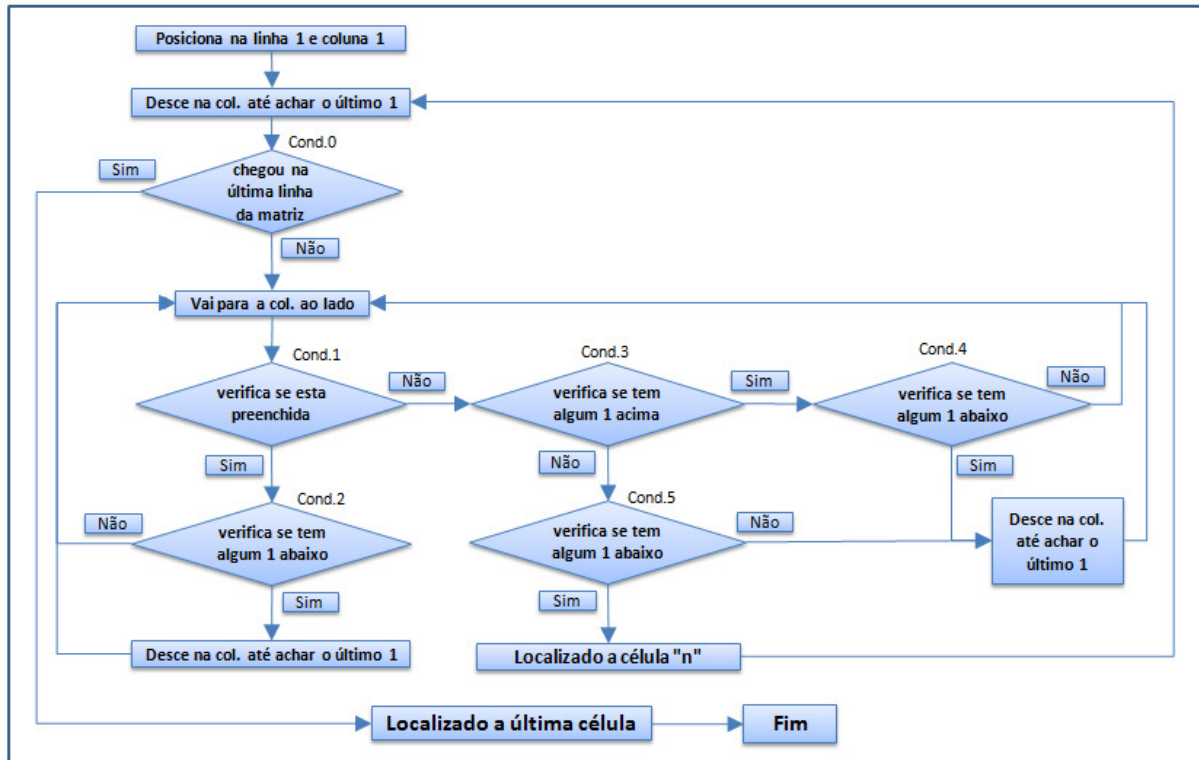


Figura 5.4 – Fluxograma para definição de agrupamentos

5.4 Interfaces

O aplicativo apresenta uma interface inicial, mostrada na Figura 5.5, para acesso a todos os módulos do sistema. São quatro módulos para cadastros, um para análises e outro para configuração e representação do layout, além de um para controle do sistema.

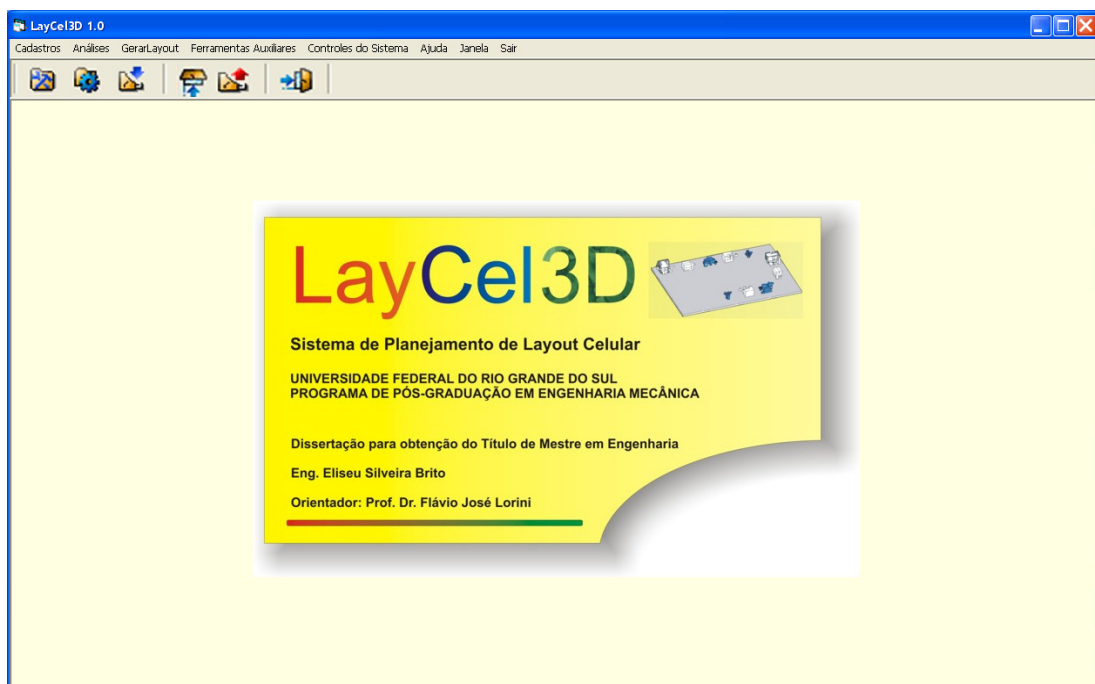


Figura 5.5 - Interface inicial do aplicativo denominado LayCel3D 1.0

O primeiro módulo de cadastro é utilizado para cadastrar categorias de máquinas, pré-requisito para o segundo módulo onde é realizado o cadastro das máquinas disponíveis para utilização. O terceiro módulo tem a função de registrar as peças a serem fabricadas, e o último módulo permite realizar o cadastramento do planejamento do processo destas peças.

Com as etapas de cadastramento realizadas, o sistema permite utilizar o algoritmo de agrupamento disponível no módulo de análises para a formação das células ou caso já possua estes agrupamentos definidos, utilizar diretamente o módulo de configuração e representação do layout 3D.

O modelamento geométrico de cada máquina é um pré-requisito para utilização do aplicativo. A seguir cada módulo é descrito detalhadamente.

5.4.1 Módulos para Cadastramento

Os módulos de cadastramento têm a função de registrar todas as informações necessárias para o sistema processar os algoritmos definidos, gerar os agrupamentos de máquinas e peças e sua representação gráfica.

O primeiro módulo tem o objetivo de cadastrar grupos (tipos, categorias) de máquinas, conforme mostra a Figura 5.6. Ao cadastrar um novo grupo o sistema cria um identificador para este tipo de máquina automaticamente, sendo que a descrição e referência para este grupo de máquina ainda deve ser informada (ex.: Fresadoras - FR, Tornos - TR, etc.).

Estas informações serão utilizadas no cadastro de máquinas para novas máquinas ou pesquisa por máquinas já catalogadas.

Id.	Tipo	Referência	nº de Máq. Cad.
1	Afiadora	AF	2
2	Centro de Torneamento	CT	2
3	Torno	TO	7
4	Fresadora	FR	2
5	Retífica Plana	RP	0
6	Prensa Hidráulica	PH	1
7	Mandrilhadora	MA	1
8	Tridimensional	TD	1
9	Brochadeira	BR	1
10	Retífica Center Less	RL	1
11	Centro de Usinagem	MC	11
12	Retífica Cilíndrica	RC	1
13	Eletro a Fio	EF	3
14	Eletro Penetração	EP	1

Figura 5.6 - Interface de cadastramento de tipo de máquina

O segundo módulo tem a função de realizar o cadastramento das máquinas, conforme mostrado na Figura 5.7, com sua respectiva caracterização.

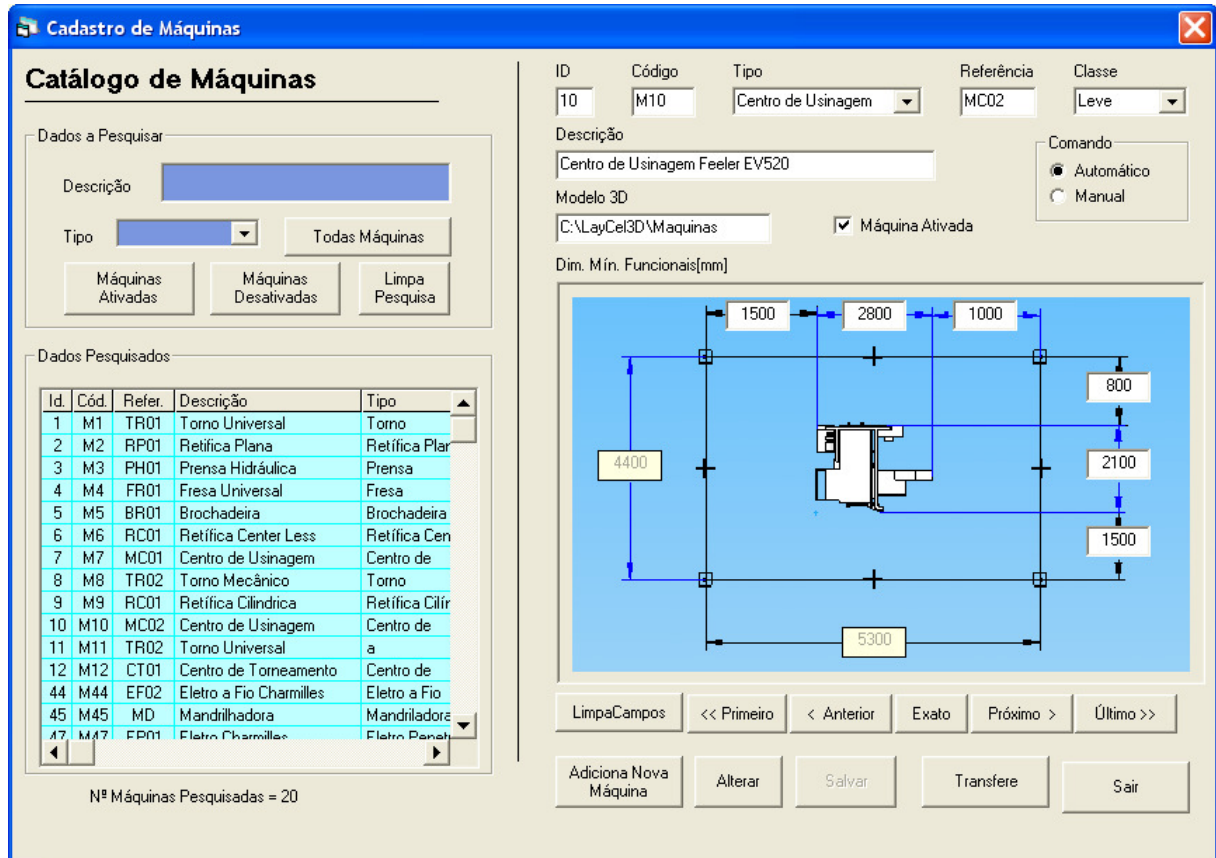


Figura 5.7 - Interface de Cadastramento das Máquinas

Ao adicionar uma máquina nova o sistema automaticamente gera um código de controle para esta máquina, que deve ser associado aos tipos de máquina cadastrados que já estão armazenados no módulo de tipos de máquinas (ex. Afadoras, Tornos, etc.) e uma referência também é criada automaticamente. Define-se ainda uma classe (leve, média ou pesada), uma descrição (ex. Torno Universal, Centro de Usinagem, etc.), bem como se o comando é automático ou manual. A cada máquina é associado o respectivo modelo geométrico previamente desenvolvido em arquivo gráfico onde estão especificadas suas dimensões reais. Na interface, além de informar estas dimensões reais do modelo, é necessário também aquelas relativas ao espaço em redor da máquina, respeitando dimensões mínimas funcionais para operação, circulação, movimentação e manutenção quando instalada no chão-de-fábrica em determinada configuração de layout. A este espaço total necessário para uma máquina, neste trabalho, denomina-se “tapete virtual de uma máquina”. Esta interface também tem a funcionalidade de pesquisar as máquinas cadastradas através de vários filtros para pesquisa,

como por exemplo sua descrição, tipo, caractere curinga (%) que pode ser usado para uma pesquisa mais ampla significando qualquer cadeia de caracteres, etc. Possibilita também editar os dados cadastrados quando da necessidade de, por exemplo, desativar/ativar ou alterar dimensões mínimas funcionais de alguma máquina. Esta interface é utilizada também quando no módulo de cadastro de processos é realizado o evento de adicionar nova operação em um processo, pois realiza-se a escolha da máquina que realizará a operação e através do ícone “transfere” adiciona-se esta máquina ao processo, pois desta forma garante-se que somente máquinas cadastradas sejam utilizadas.

Um terceiro módulo serve para cadastrar as peças, conforme mostrado na Figura 5.8.

Figura 5.8 - Interface de Cadastramento das Peças

Para cada nova peça adicionada, um código é gerado automaticamente, definindo-se o status da peça (ativada ou desativada) e sua descrição (ex. Engrenagem principal, Base inferior, etc.). A interface também tem a funcionalidade de pesquisar as peças cadastradas, tendo vários filtros para pesquisa, como por exemplo, sua descrição, status, peças com ou sem processo definido e o caractere curinga (%). Nela também é possível editar os dados cadastrados quando da necessidade de alguma alteração de status ou descrição. Semelhante ao módulo anterior, esta interface é utilizada também quando no módulo de cadastro de processos é realizado o evento de adicionar novo processo, pois ao ser acionada esta interface,

o sistema utiliza o filtro de pesquisa mostrando somente as peças que ainda não possuem cadastro; faz-se, então, a escolha da peça para a qual se deseja criar o processo e através do ícone “transfere” volta-se ao módulo de cadastro de processo. Este mecanismo garante que somente peças cadastradas tenham processos definidos, sendo estes únicos.

Um quarto módulo tem o propósito de cadastrar o processo a que cada peça é submetida, conforme mostrado na Figura 5.9.

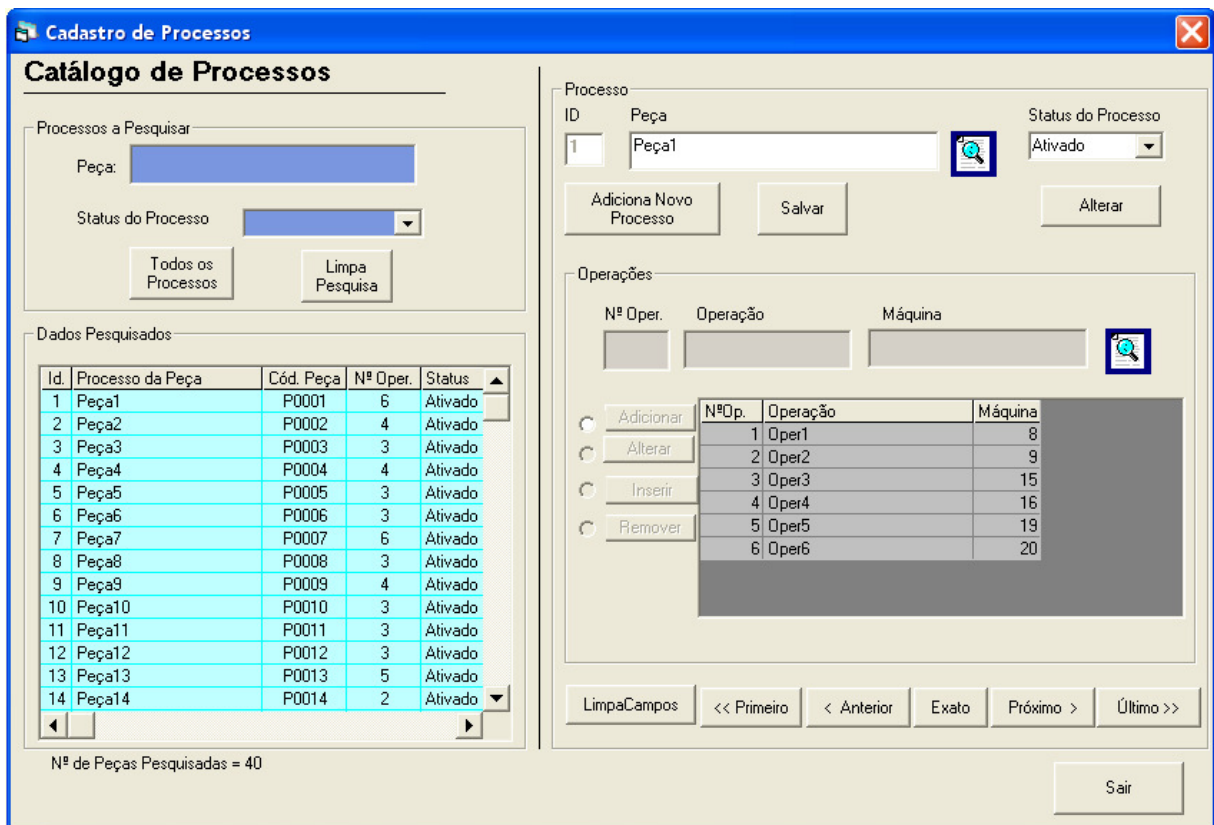


Figura 5.9 - Interface de Cadastramento dos Processos

Ao adicionar um novo processo, uma identificação (ID) é criada automaticamente e abre-se a interface de cadastro de peças com as peças que ainda não tiveram seu processo definido. Ao escolher a peça a ser criado o processo transfere-se esta peça para realizar a definição de processo. Esta transferência é necessária para garantir o relacionamento entre as tabelas do banco de dados. A cada peça é associado seu *Status* (ativado ou desativado) bem como todas as operações necessárias para a fabricação. A cada operação adicionada é necessário descrever o nome da operação e a máquina associada. O campo “máquina” é necessário selecionar a partir do cadastro de máquinas para garantir o relacionamento entre tabelas e a integridade dos dados. Para itens já cadastrados é possível editar o status deste processo e adicionar, alterar, inserir ou remover operações dentro deste processo.

5.4.2 Módulo para Análises

Este módulo, mostrado na Figura 5.10, tem uma primeira função que é a de processar todas as informações que foram cadastradas, relativas a máquinas, peças e processos para formar a matriz de incidência do sistema. Esta figura mostra a matriz de incidência do conjunto de dados estudados por Boe e Cheng, 1991.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
M1	1	1	1																	
M2				1	1															
M3						1	1													
M4								1	1											
M5										1	1									
M6																				
M7																				
M8																				

Figura 5.10 - Interface de processamento e análise do algoritmo de agrupamento

A segunda atribuição é a aplicação do algoritmo para reordenar a matriz de incidência, transformando-a em uma matriz diagonalizada.

Este módulo ainda executa uma terceira função, que é transformar a matriz diagonalizada em agrupamentos de peças e máquinas, ou seja, definir as fronteiras da célula automaticamente.

Para montar a matriz de incidência, o sistema agrupa todas as informações do banco de dados em uma matriz de incidência peça-máquina, registrando como “1” onde a peça é processada pela máquina e “0” (zero) ou “ ” (vazio) onde não existe processamento. A Figura 5.11 ilustra um exemplo destas informações classificadas em uma matriz de incidência. Nela também é mostrado o início das operações realizadas para aplicar o algoritmo de ordenamento, o algoritmo descrito no item 3.4.2.1 deste trabalho. Na programação no *Visual Basic*, comandos e técnicas de manipulação de matrizes e classificação tipo *Bubble Sort* foram utilizados. Na Figura 5.11 (a) são mostradas etapas do algoritmo ROC, como por exemplo, a que converte cada linha da matriz em decimal e classifica em ordem decrescente de cima para baixo. As demais etapas do algoritmo são processadas até se chegar à matriz diagonalizada, mostrado na Figura 5.11 (b). Este exemplo mostra uma matriz pequena proposta por King e

Nakornchai, 1982, mas matrizes até 30x40 foram testadas e não foram constatadas diferenças significativas de tempo de processamento.

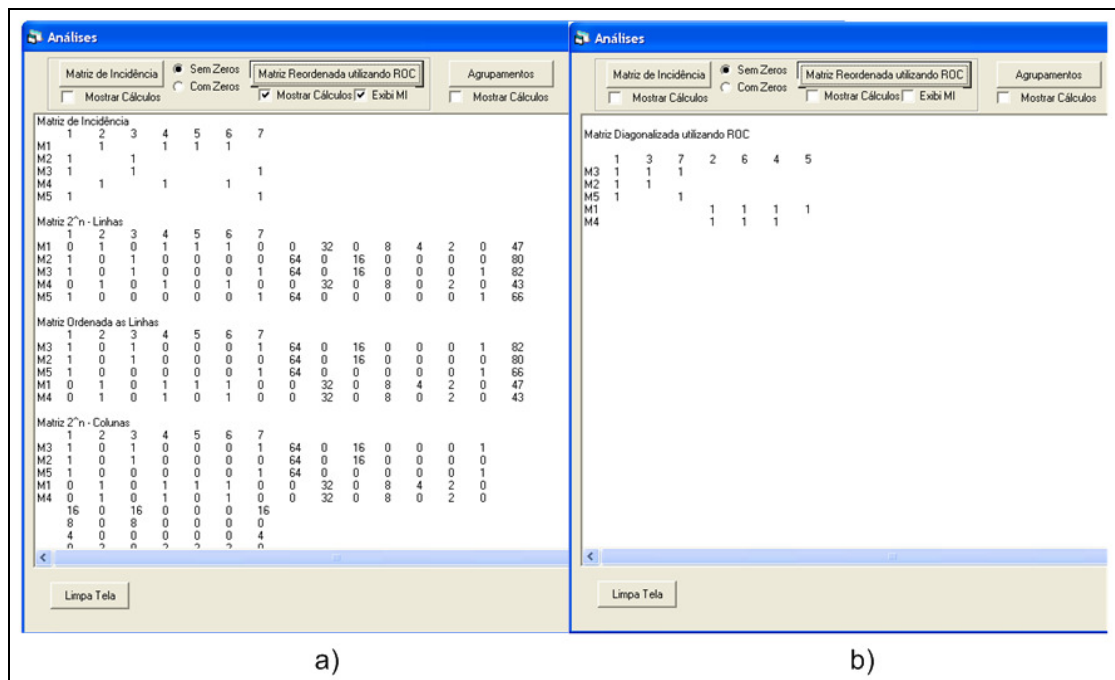


Figura 5.11 - a) Fase inicial do algoritmo b) Matriz diagonalizada

As fronteiras das células são definidas automaticamente e mostradas na tela com um resumo de cada agrupamento processado, assim como um arquivo texto é gerado e salvo no diretório raiz do aplicativo. A Figura 5.12 mostra o resultado desta metodologia aplicada ao conjunto de dados proposto por Lee *et al.*, 1997. Estas informações servem de entrada automática para o próximo módulo e principal motivo desta pesquisa, a representação tridimensional.

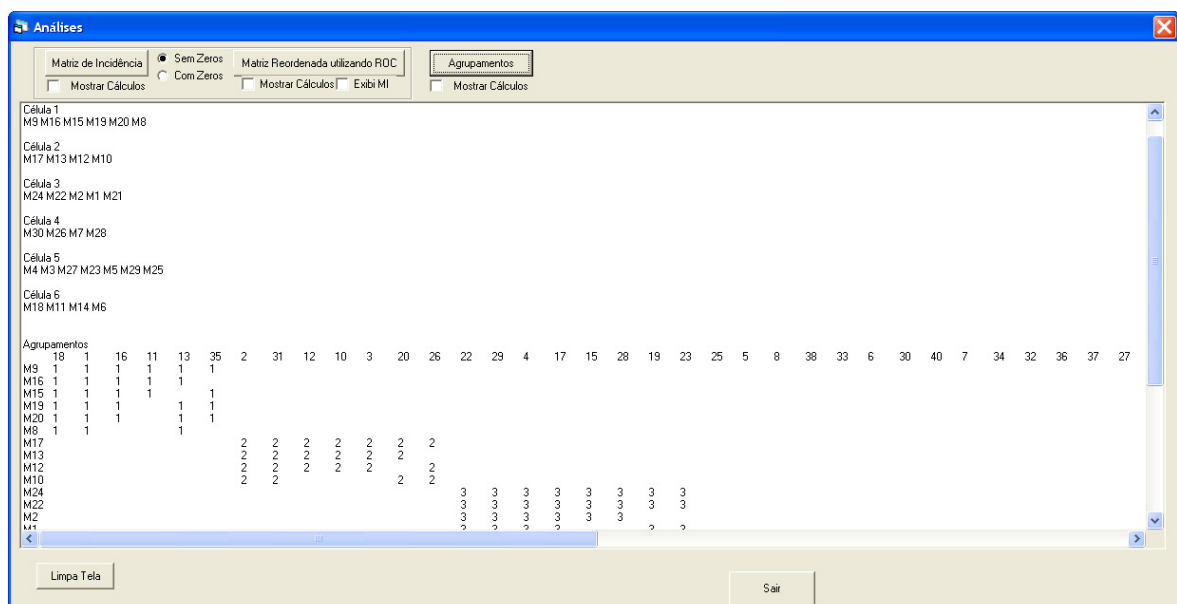


Figura 5.12 - Fronteira de células definidas

5.4.3 Módulo para Configuração e Representação do Layout

Este módulo tem a função de estruturar os dados necessários para a representação gráfica do projeto de layout celular em estudo, definindo-se as configurações das formas de fluxo, conforme ilustrado na Figura 5.13.

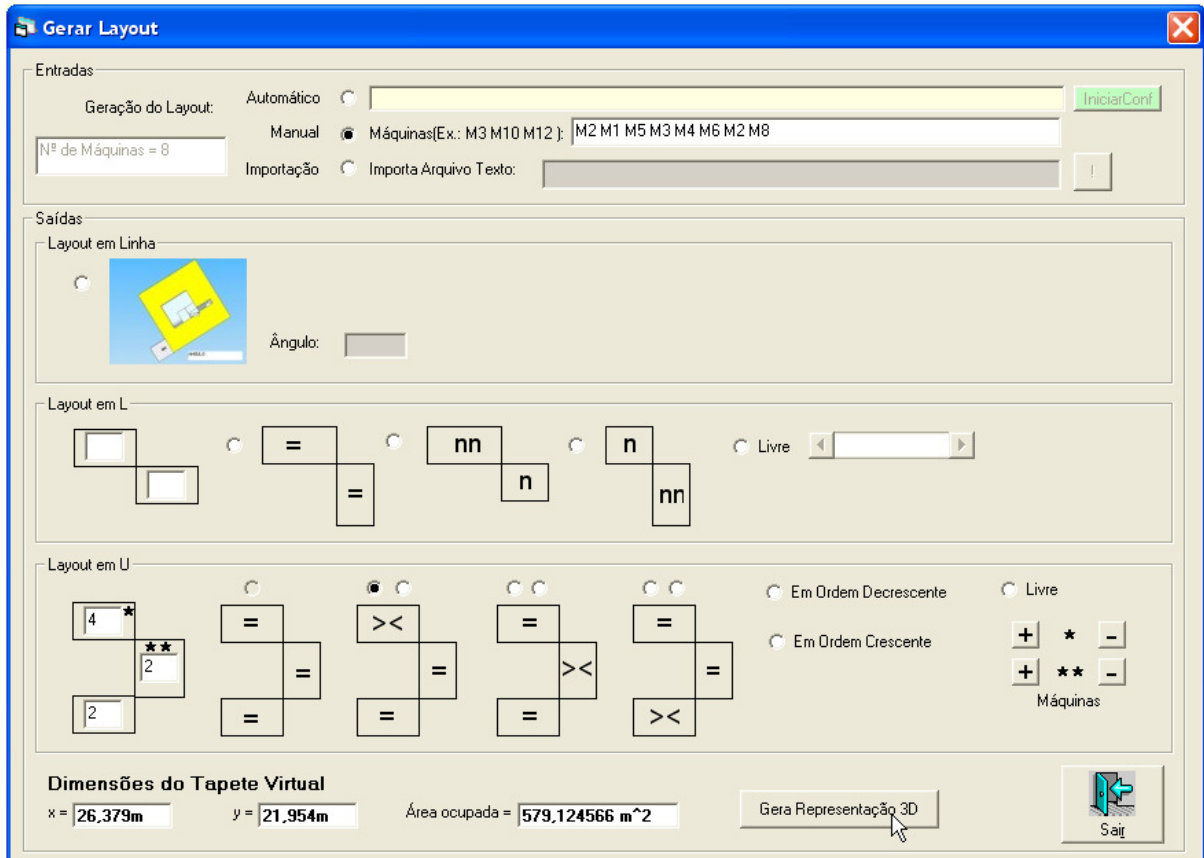


Figura 5.13 - Interface para escolha das opções de formas de fluxo para layout

Como dados de entrada definem-se as máquinas que compõem a célula em estudo, para um projeto de layout gerado através do algoritmo interno, de forma manual ou por importação, conforme descrito a seguir:

- Automático: neste modo utiliza-se o processamento realizado no módulo de análise, ou seja, faz-se a representação gráfica dos agrupamentos criados pelo algoritmo proposto no trabalho;
- Manual: utilizando este modo é possível fazer a definição da célula através da digitação das máquinas diretamente no sistema, associando-se as máquinas que fazem parte da célula. Um exemplo de aplicação é quando já se dispõe do

agrupamento e se deseja estudar outras formas de fluxo ou alterar dimensões mínimas funcionais. Agrupamentos criados através da experiência de projetista de layout ou a utilização de outros algoritmos também podem ser representados graficamente através desta opção;

- **Importação:** este modo permite fazer a definição das máquinas que compõe a célula através da importação de um arquivo texto. Este arquivo pode ser o resultado da aplicação de algum outro algoritmo ou criado pelo próprio usuário utilizando outras técnicas de formação de célula.

A representação do layout em ambiente gráfico pode ser obtida em diferentes formas de fluxo, tendo-se como opção o fluxo em linha, em “L” ou em “U”. Para as formas de fluxo em “L” e em “U” o sistema permite opções de distribuição das máquinas, dentro da configuração selecionada.

- **Layout em Linha:** esta opção de fluxo gera um layout com todas as máquinas em linha. Tem-se o recurso de definir o ângulo de posição de cada máquina em relação ao alinhamento imaginário de um padrão de layout em linha, o valor inicial é zero grau, podendo alterá-lo para diferentes angulações;
- **Layout em “L”:** esta configuração gera um layout com padrão de fluxo em “L”. São permitidas quatro opções de configuração do número de máquinas em cada segmento (parte) do “L”. A primeira define o mesmo número de máquina em cada segmento. Na segunda gera-se um layout com um número maior de máquinas no primeiro segmento do layout. Na terceira opção inverte-se esta disposição, ficando menos máquinas na primeira parte. Nestas duas últimas opções o sistema calcula uma diferença de uma ou duas máquinas entre os segmentos do layout, dependendo de ser o total de máquinas um número par ou ímpar. A última opção dá liberdade ao usuário de definir livremente o número de máquinas em cada segmento. Para cada opção escolhida pode-se verificar como ficou a disposição através de um mostrador que o sistema oferece;

- Layout em “U”: através desta opção o sistema representa um layout com padrão de fluxo em “U”. Na mesma linha de raciocínio da opção anterior, tem-se várias opções de configuração. Neste tipo de fluxo três segmentos são configuráveis. Uma primeira opção é que os três segmentos tenham o mesmo número de máquinas. Outras seis opções são oferecidas permitindo representar casos onde dois segmentos tenham o mesmo número de máquinas e o terceiro seja diferente. Ainda tem a opção de representar em ordem crescente ou decrescente, ou seja, o sistema calcula conforme o número total de máquinas como distribuir em cada segmento um número de máquinas que atendam este critério. Um exemplo da opção decrescente seria para um total de seis máquinas o primeiro segmento ficará com três, o segundo com duas e o terceiro com uma máquina. Nestas duas últimas opções existem alguns casos que poderão resultar em um mesmo número de máquinas em dois segmentos. Há ainda a opção de configuração livre, podendo-se alterar o número de máquinas em cada setor conforme a necessidade.

Para cada tipo de configuração, o sistema dispõe automaticamente somente as opções possíveis de serem realizadas, bloqueando as que não são adequadas, como por exemplo, para um número total de máquinas ímpar não é possível representar um layout em “L” com número igual de máquinas em cada segmento. O “tapete virtual”, de acordo com a configuração escolhida, tem as dimensões resultantes indicadas pelo aplicativo. A cada alteração de configuração estes valores são atualizados automaticamente.

O usuário ao concluir a configuração desejada deve iniciar o software *Solid Edge*® para então o sistema estar com todas as condições necessárias para gerar a representação tridimensional do layout.

5.4.3.1 Cálculos para posicionamento e dimensionamento das máquinas no layout

A formulação matemática utilizada para cálculo do posicionamento das máquinas no layout e das dimensões do “tapete virtual” de uma máquina ou célula é descrita a seguir.

Cada máquina cadastrada possui seus valores armazenados no banco de dados atrelados a variáveis mostradas esquematicamente na Figura 5.14.

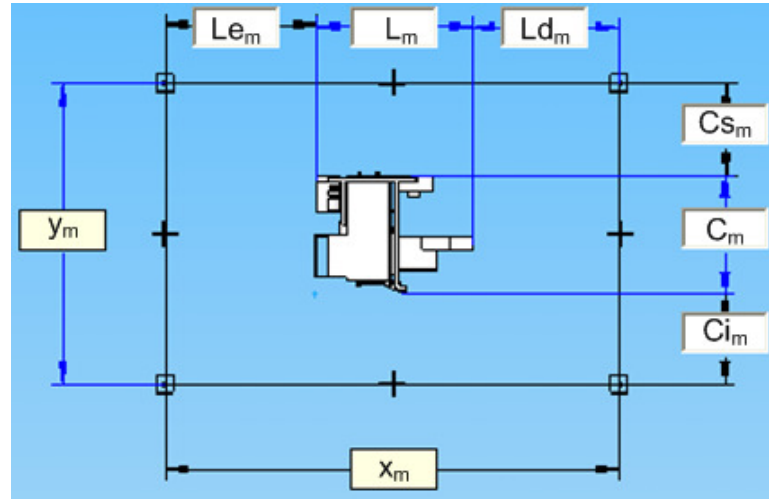


Figura 5.14 - Variáveis atribuídas às dimensões de cada máquina

Estas variáveis também são utilizadas para cálculo das dimensões do “tapete virtual” de uma célula, ou seja, o espaço ocupado por todas as máquinas, que está representado esquematicamente na Figura 5.15.

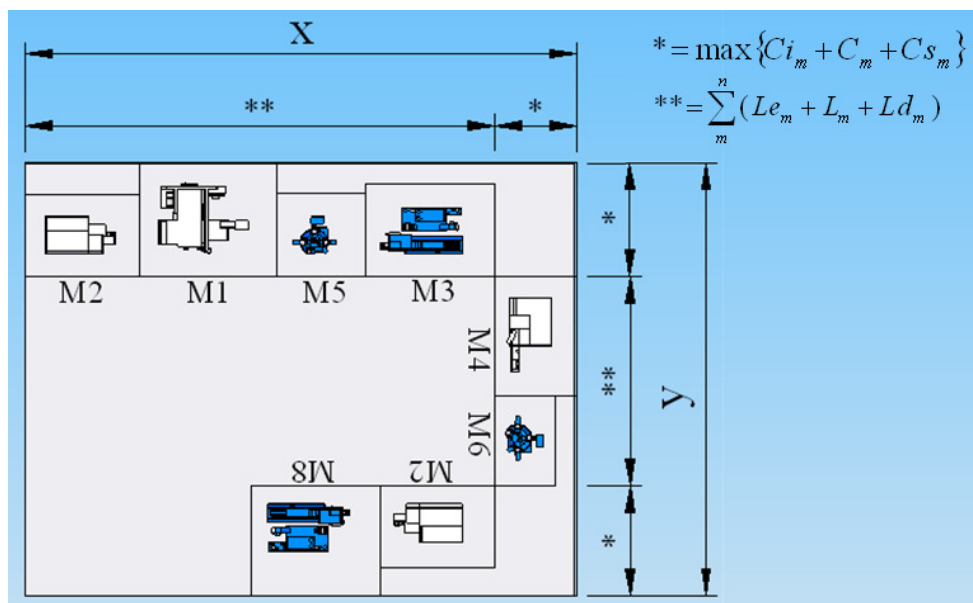


Figura 5.15 - Visualização de um layout gerado e suas dimensões representadas

- Cálculo das dimensões do “tapete virtual” para Layout em Linha

$$x = \sum_{m=1}^n (L_{e_m} + L_m + L_{d_m}) \quad (5.1)$$

onde, x é a dimensão longitudinal do “tapete virtual” da célula, n o número total de máquinas, m representa cada uma das máquinas, L_{e_m} o valor mínimo funcional referente ao Lado esquerdo, L_m a dimensão longitudinal e L_{d_m} o valor mínimo funcional do Lado direito.

$$y = \max\{Ci_m + C_m + Cs_m\}, m = 1, \dots, n \quad (5.2)$$

onde, y é a dimensão transversal do “tapete virtual” da célula, Ci_m o valor mínimo funcional referente ao espaço frontal da máquina, C_m a dimensão transversal e Cs_m o valor mínimo funcional do espaço da parte de trás da máquina.

- Cálculo das dimensões do “tapete virtual” para Layout em L

$$x = \left[\sum_{m=1}^a (Le_m + L_m + Ld_m) \right] + \left[\max\{Ci_m + C_m + Cs_m\}, m = a+1, \dots, n \right] \quad (5.3)$$

onde, a é o número de máquinas no primeiro segmento do layout.

$$y = \left[\max\{Ci_m + C_m + Cs_m\}, m = 1, \dots, a \right] + \left[\sum_{m=a+1}^n (Le_m + L_m + Ld_m) \right] \quad (5.4)$$

- Cálculo das dimensões do “tapete virtual” para Layout em U

$$x = \left[\max \left\{ \left[\sum_{m=1}^a (Le_m + L_m + Ld_m) \right], \left[\sum_{m=a+b+1}^n (Le_m + L_m + Ld_m) \right] \right\} \right] + \left[\max\{Ci_m + C_m + Cs_m\}, m = a+1, \dots, a+b \right] \quad (5.5)$$

onde, b é o número de máquinas no segundo segmento do layout.

$$y = \left[\max\{Ci_m + C_m + Cs_m\}, m = 1, \dots, a \right] + \left[\sum_{m=a+1}^{m=a+b} (Le_m + L_m + Ld_m) \right] + \left[\max\{Ci_m + C_m + Cs_m\}, m = a+b+1, \dots, n \right] \quad (5.6)$$

5.4.4 Módulo para controlos do sistema

A principal função deste módulo é possibilitar ao usuário utilizar mais de um banco de dados. Pode-se, desta forma, utilizá-lo para vários ambientes de fabricação ou estudos de layout que venham a ser necessários. A cópia de arquivos de bancos de dados com informações referentes a um determinado ambiente pode ser realizado via Windows[®], sendo

as alterações realizadas por esse aplicativo, possibilitando salvar novas configurações de ambientes de manufatura a serem estudados, modificados, etc. A interface com suas características é mostrada na Figura 5.16.

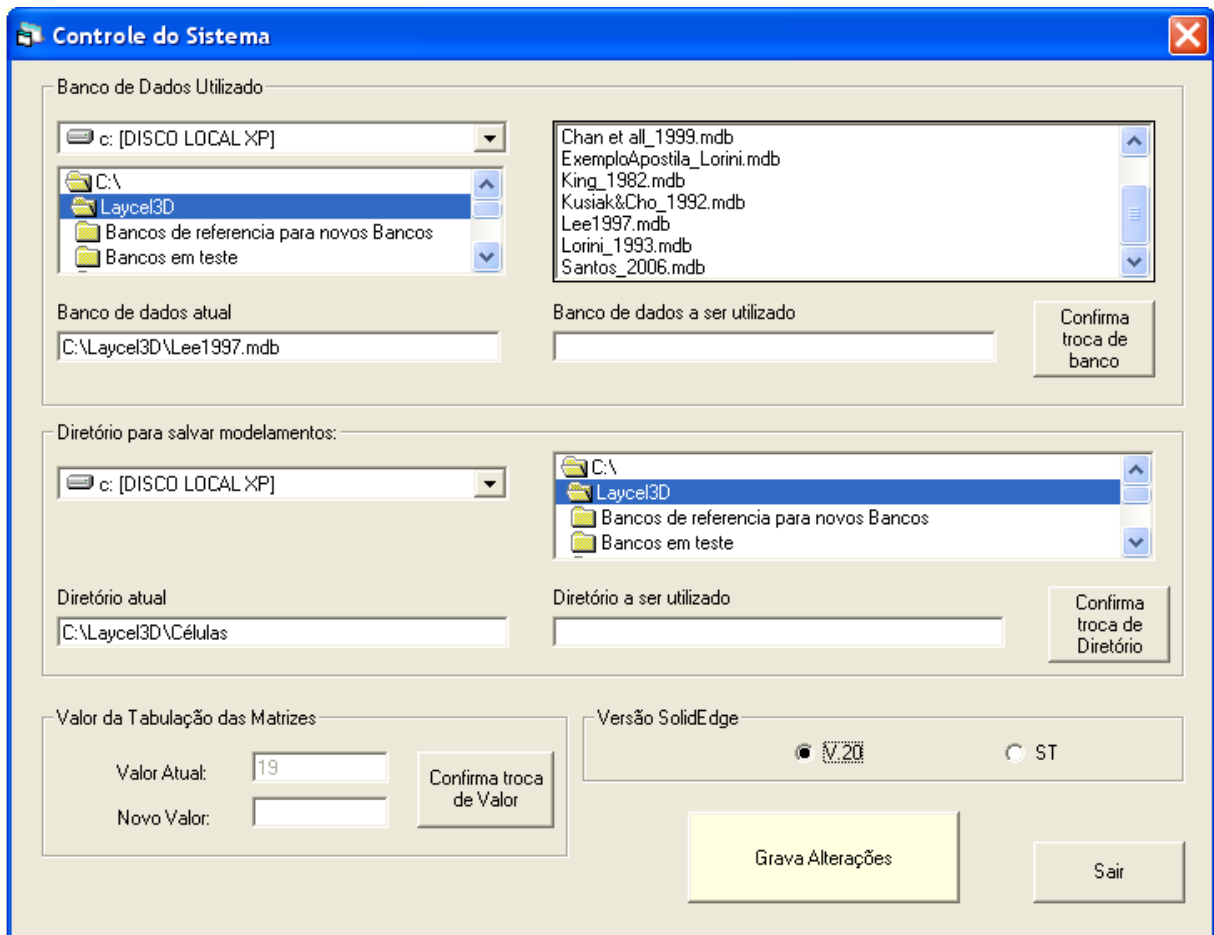


Figura 5.16 - Interface controle do sistema

Sendo o foco principal deste trabalho a representação gráfica do resultado obtido por alguma técnica de formação de células, sistemas onde o algoritmo ROC não tenha um bom resultado, ou seja, não tenha uma boa diagonalização ou a matriz tenha muita dispersão, não são aqui resolvidos, uma vez que o aplicativo tem a opção de importação de resultados de outros algoritmos que foram desenvolvidos por seus autores para tratar especificamente estes tipos de sistemas.

A opção disponibilizada no aplicativo de mostrar os cálculos realizados permite a verificação dos resultados obtidos, podendo ser utilizado para entendimento do algoritmo também como ferramenta didática.

Resultados importantes obtidos pelo aplicativo são a identificação e a definição automática das fronteiras dos agrupamentos através do algoritmo desenvolvido. Desta forma, é possível gerar as informações necessárias para, no módulo de configuração do layout, realizar a representação gráfica de cada agrupamento automaticamente. Para a matriz em estudo, o resultado da metodologia e sua implementação são ilustrados na Figura 6.3, onde é verificado o número de células encontrado para a massa de dados analisados e quais máquinas estão contidas em cada uma delas. Na matriz estudada nota-se a formação de seis agrupamentos, com as fronteiras identificadas automaticamente, não necessitando nenhuma ação do usuário.

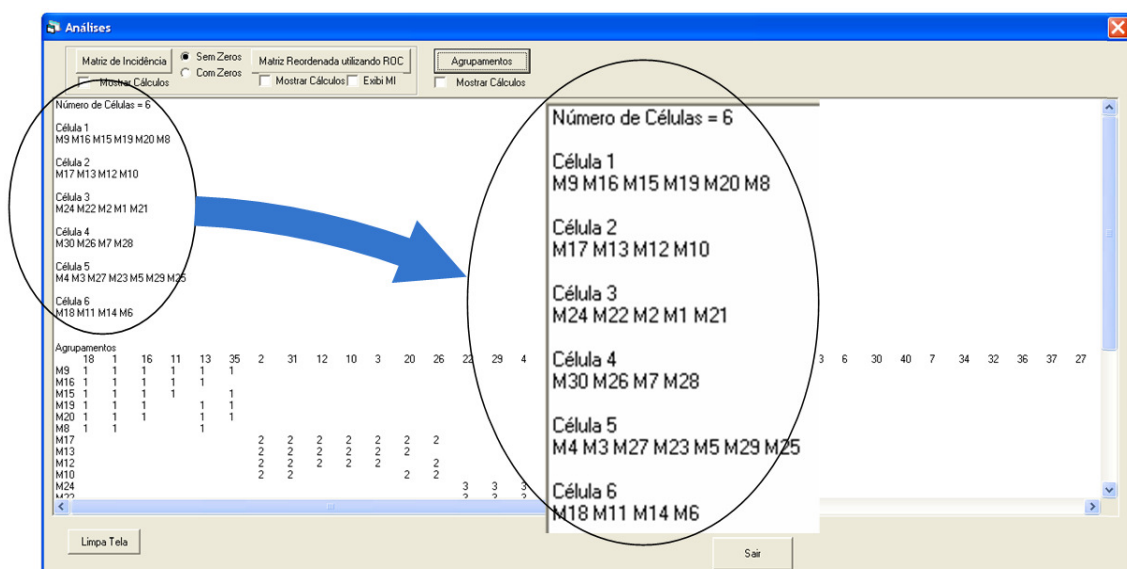


Figura 6.3 - Agrupamentos obtidos mostrados em forma de texto

Na Figura 6.4 é mostrado o mesmo resultado, só que de forma gráfica, onde destaca-se a composição das máquinas e peças que integram cada célula, representada pelo número da respectiva célula na matriz.

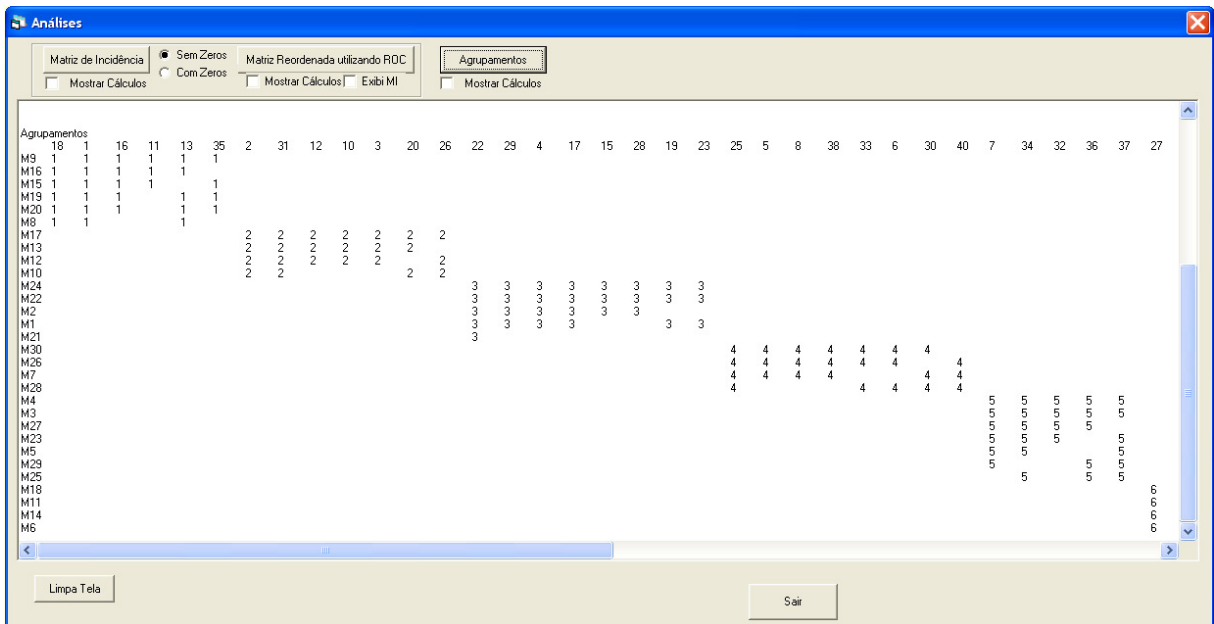


Figura 6.4 - Agrupamentos obtidos mostrados em forma de matriz

A Figura 6.5 ilustra mais três matrizes de teste que tiveram bons resultados com a metodologia de identificação das fronteiras dos agrupamentos automaticamente, sendo estas citadas por King e Nakornchai, 1982; Lorini, 1993 e Chan *et al.*, 1999.

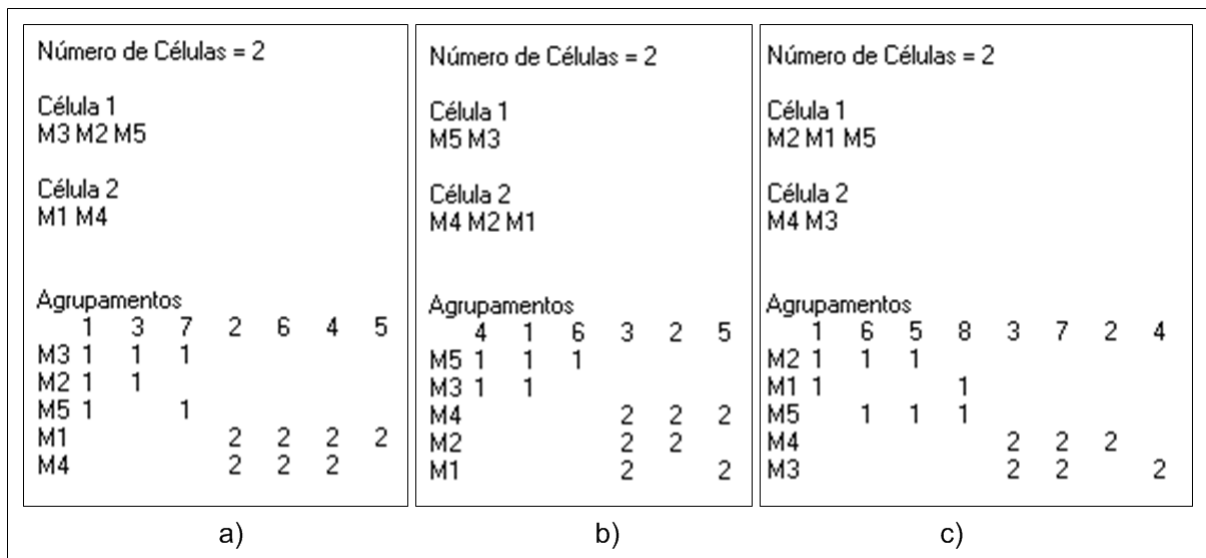


Figura 6.5 – Agrupamentos obtidos de forma automática

No entanto, para algumas outras matrizes testadas, a metodologia desenvolvida gerou uma única célula para o sistema. Isto ocorre basicamente pela ineficiência na diagonalização, método ROC, por estar resolvendo uma matriz que possui muita dispersão, devido a ocorrência de incidências extracelulares e condições não previstas no algoritmo desenvolvido para a definição de fronteiras dos agrupamentos. Porém, a escolha de um outro método, que

não o ROC, resolveria os casos onde este método não eficiente, mas casos bem resolvidos pelo ROC passariam a apresentar problemas, sendo uma solução a utilização de vários métodos para encontrar aquele que melhor se adapte à situação em estudo. A Figura 6.6 ilustra um exemplo de uma matriz onde a metodologia encontrou um único agrupamento para o sistema, pois o algoritmo ROC não faz uma boa diagonalização, sendo para esta matriz recomendado a utilização do algoritmo *Close Neighbour Algorithm* – CNA, conforme Boe e Cheng, 1991. Outros exemplos de sistemas identificados como célula única foram as matrizes utilizados por Baker e Maropoulos, 1997 e Kusiak e Cho, 1992 *apud* Tahara, 2001.

Matriz Diagonalizada utilizando ROC																				
	10	12	1	5	15	6	17	20	9	3	4	7	18	11	14	2	8	16	13	19
M5	1	1	1	1	1	1	1													
M6	1	1	1	1	1			1	1											
M4	1					1		1		1	1	1	1							
M7		1				1		1		1	1	1	1	1						
M2						1		1		1	1	1	1		1					
M8						1		1		1	1	1	1							
M1							1		1					1	1	1	1	1	1	1
M3							1		1					1	1	1	1	1	1	1

Figura 6.6 - Exemplo de matriz com obtenção de agrupamento único

Os próximos resultados analisados são produtos da principal função do aplicativo, que corresponde ao modelamento 3D dos agrupamentos identificados pelo sistema. Estes modelamentos podem ser obtidos através da opção automática que utiliza o algoritmo ROC e algoritmo de definição das fronteiras dos agrupamentos, ou pela opção manual ou ainda pela opção de importação, conforme detalhado a seguir.

Como resultado do módulo de análises, o aplicativo oferece no módulo de representação gráfica a opção “Automático”, onde são mostradas as células identificadas pela metodologia proposta neste trabalho que serão representadas em 3D, conforme mostrado na Figura 6.7. O modelamento é obtido de forma automática ao selecionar esta ação no aplicativo, sendo gerado um arquivo SolidEdge para cada célula identificada, de acordo com padrão de fluxo configurado individualmente.

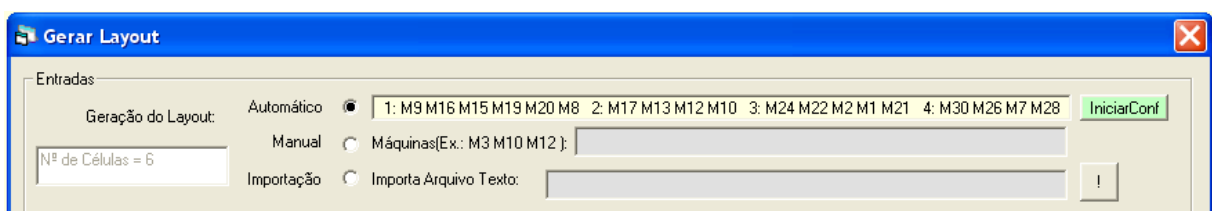


Figura 6.7 - Células a representar automaticamente no LayCel3D

Na interface de configuração do fluxo o sistema define as dimensões do tapete virtual e a área ocupada. Desta forma, o LayCel3D possibilita comparar diferentes resultados obtidos com suas condições de estudo, conforme ilustrado na Figura 6.8.

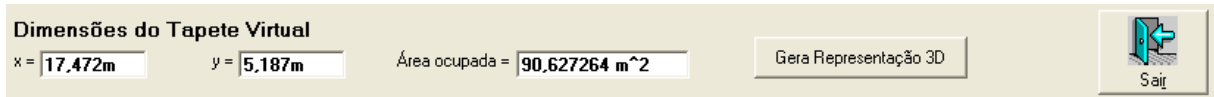


Figura 6.8 - Dimensões e área do tapete virtual

A Figura 6.9 ilustra um exemplo do principal resultado deste trabalho, ou seja, a representação gráfica com modelamento 3D de seis células identificadas automaticamente pela metodologia desenvolvida para o sistema estudado neste trabalho. Cada arquivo de montagem é identificado com o nome “CelAutomatico” acrescido de número correspondente a célula representada.

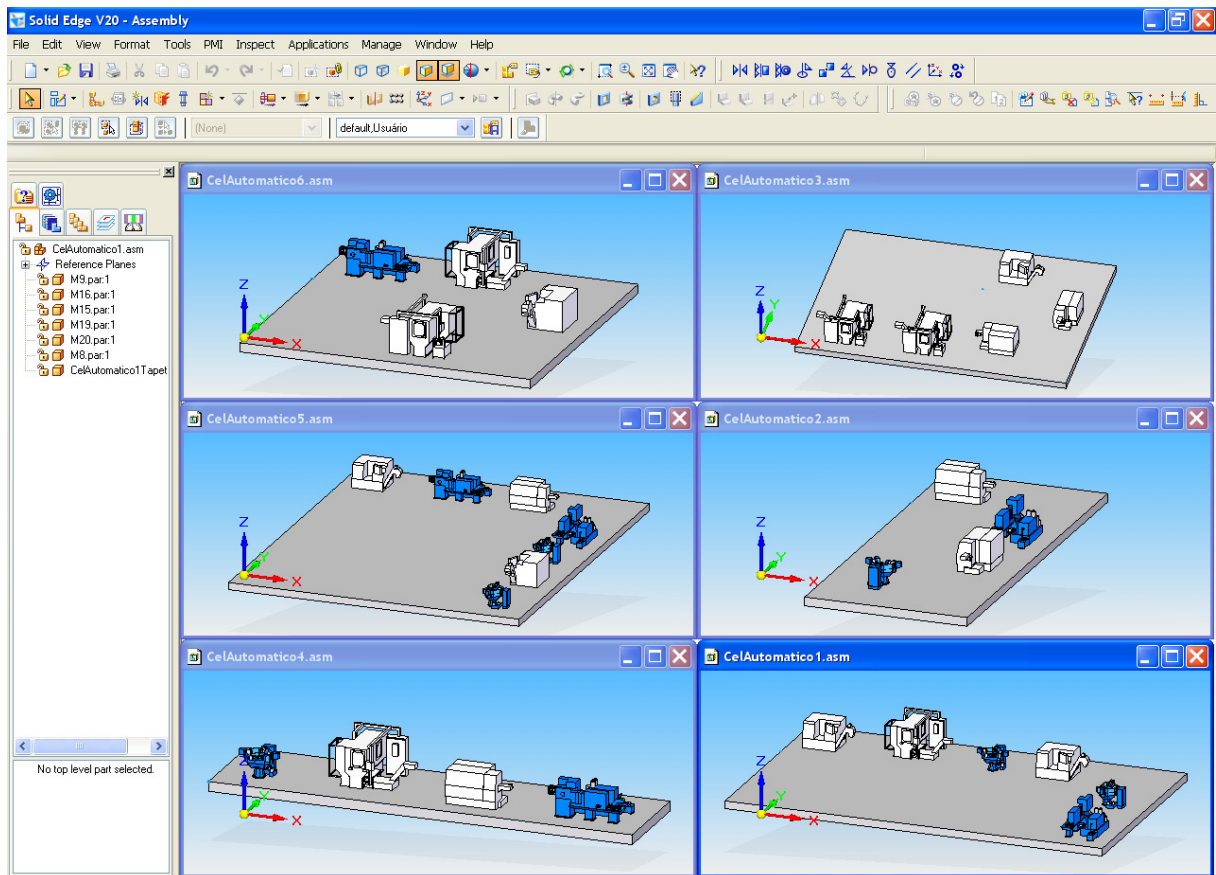


Figura 6.9 - Modelamento das seis células identificadas pelo Laycel3D

Para aqueles sistemas onde a metodologia proposta para identificação automática dos agrupamentos não é adequada, o sistema disponibiliza a opção “Manual”, onde cada célula é

configurada interativamente, ou seja, para configurar por exemplo três células, o aplicativo necessita da digitação das máquinas que integram a primeira célula, configurar o fluxo e gerar o modelamento. Para a célula dois e três o procedimento deve ser repetido individualmente, sendo necessário digitar um número de identificação para cada célula ao salvar os arquivos.

Uma possível utilização desta opção é realizar estudos de um mesmo grupo de máquinas alterando somente o tipo de fluxo escolhido. Na Figura 6.10 está representado uma mesma célula com cinco máquinas na forma de fluxo em Linha, depois em “L”, e por último em “U”. Para cada forma de fluxo, o aplicativo calcula a área necessária para locação da célula na área industrial, respeitando as dimensões mínimas funcionais de cada máquina e representando esta área modelando uma espécie de “tapete virtual” na representação 3D.

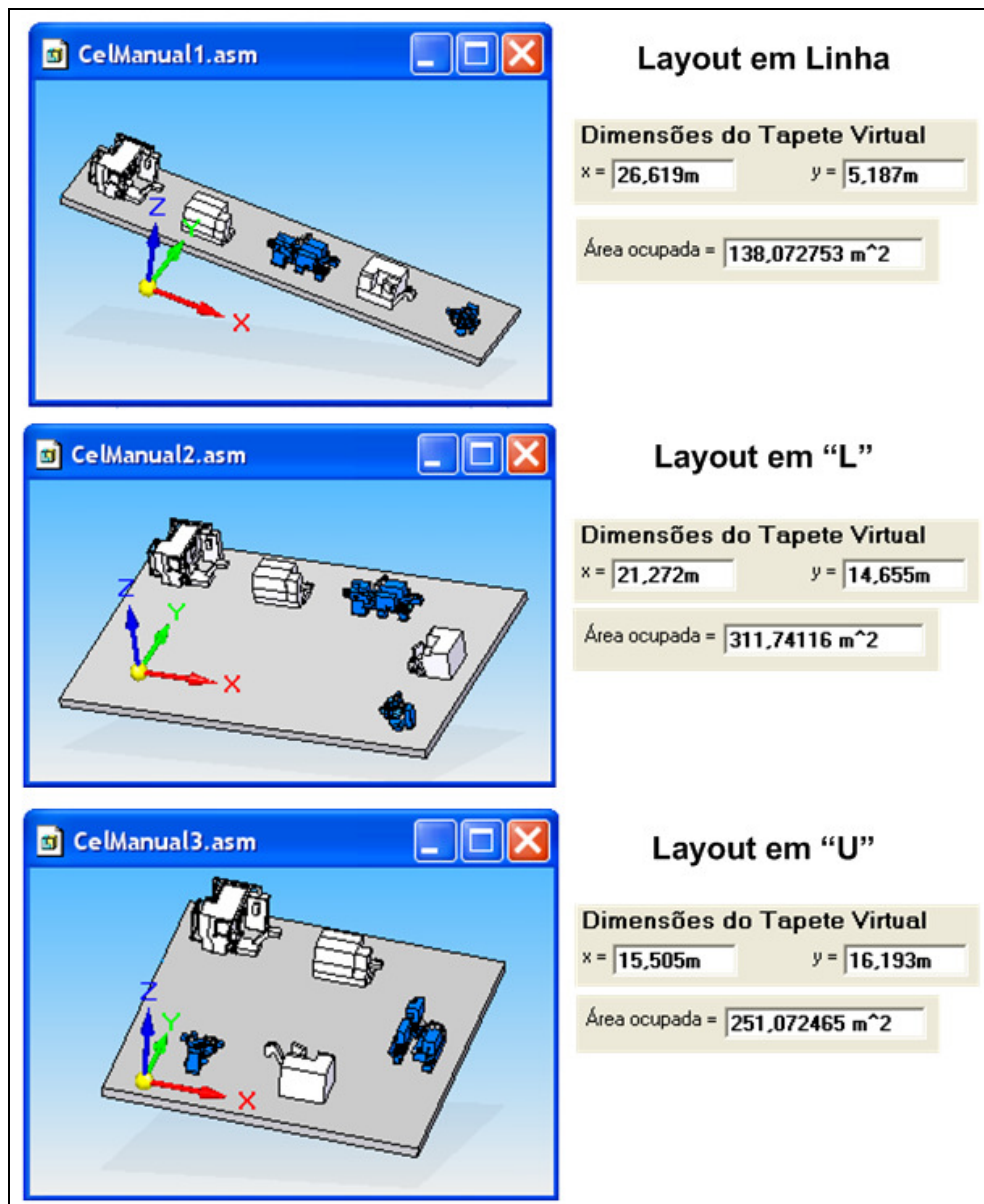


Figura 6.10 - Opções de fluxo para layout em Linha, em “L” e em “U”

O aplicativo oferece ainda a opção “Importação”, que possibilita a utilização de resultados de outros algoritmos através da importação de arquivos de texto. Neste caso, a representação pode ser de uma célula ou de várias, conforme aplicação e dados do arquivo texto. A Figura 6.11 ilustra uma célula com cinco máquinas com padrão de fluxo em “U” obtida através desta opção do aplicativo. Na representação destacam-se características como as dimensões do tapete virtual, ou seja, a área ocupada por aquela célula no ambiente industrial e também a área ocupada pelo mesmo obtida no software de modelamento. Além destas características citadas podem-se obter rapidamente outras vantagens que um modelamento 3D proporciona, como por exemplo, dimensões entre máquinas, inserir manualmente modelos de outros dispositivos necessários para a produção e verificar suas interações dimensionais com o layout desenvolvido.

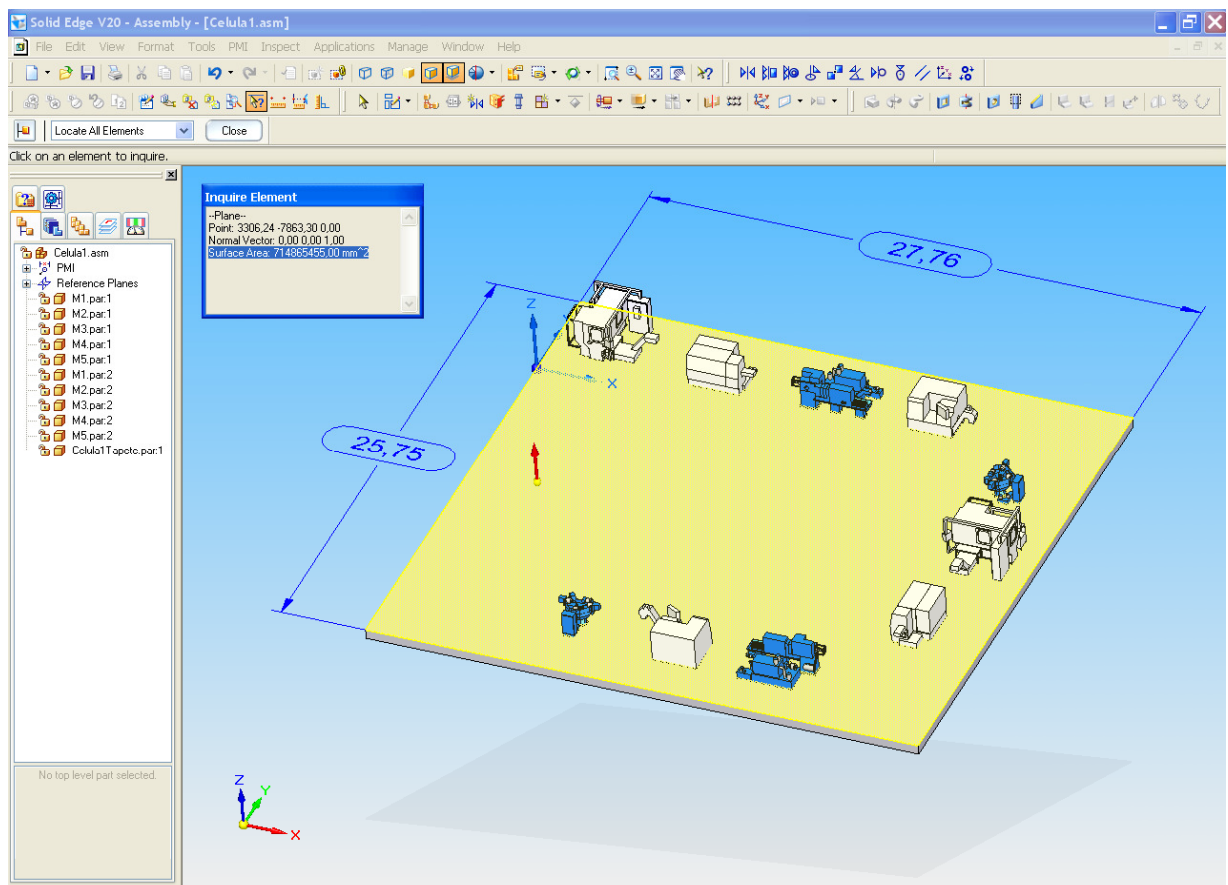


Figura 6.11 - Modelamento gerado pelo módulo de importação

Outra possibilidade é a de realizar manualmente a montagem de um arquivo com todas as células que foram modeladas automaticamente. Deste modo, como ilustra a Figura 6.12, pode-se distribuir as células com seus respectivos “tapetes virtuais” e após estudo da melhor

disposição destas, é possível obter a área total ocupada por todas as células e então comparar com o ambiente industrial disponível.

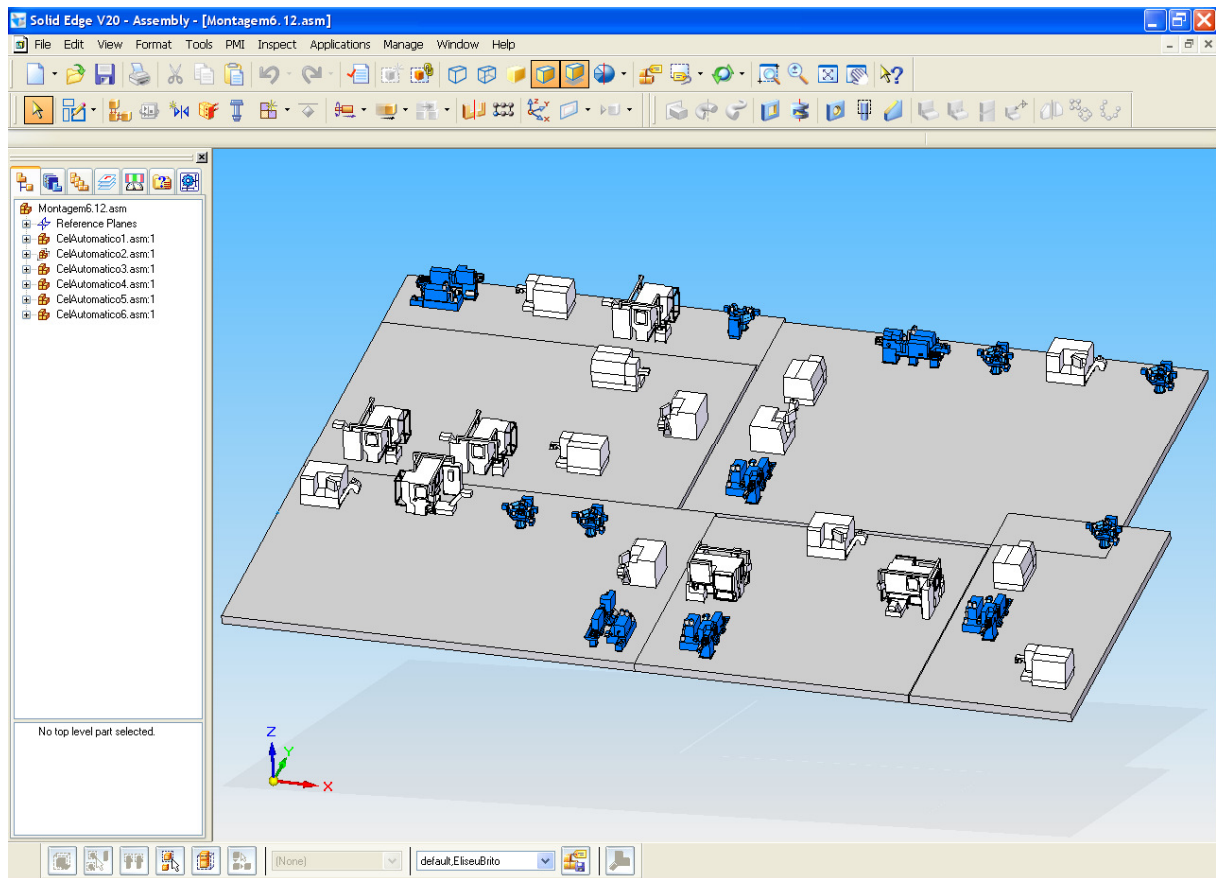


Figura 6.12 - Montagem com as seis células

Qualquer um dos modelamentos realizados pode ser exportado para outros aplicativos como base para utilização de simuladores, analisadores ergonômicos, etc.

6.1 Validação do Sistema

Para a validação do sistema em relação a cadastros, rotinas para matriz de incidência, algoritmo de classificação e identificação de agrupamentos, considerou-se que os resultados apresentados com os dados de testes são compatíveis com os objetivos do sistema.

Para validação das configurações de fluxo, realizaram-se testes para um número de máquinas entre dois e sete, onde para cada uma delas testou-se cada configuração do programa e registrado-se os fluxos obtidos, conforme mostrado na Figura 6.13. Verificou-se que o LayCel3D atende todos os combinações possíveis para este intervalo de número de máquinas e que para números maiores do que sete o programa também esta adequado, uma vez que a lógica é a mesma.

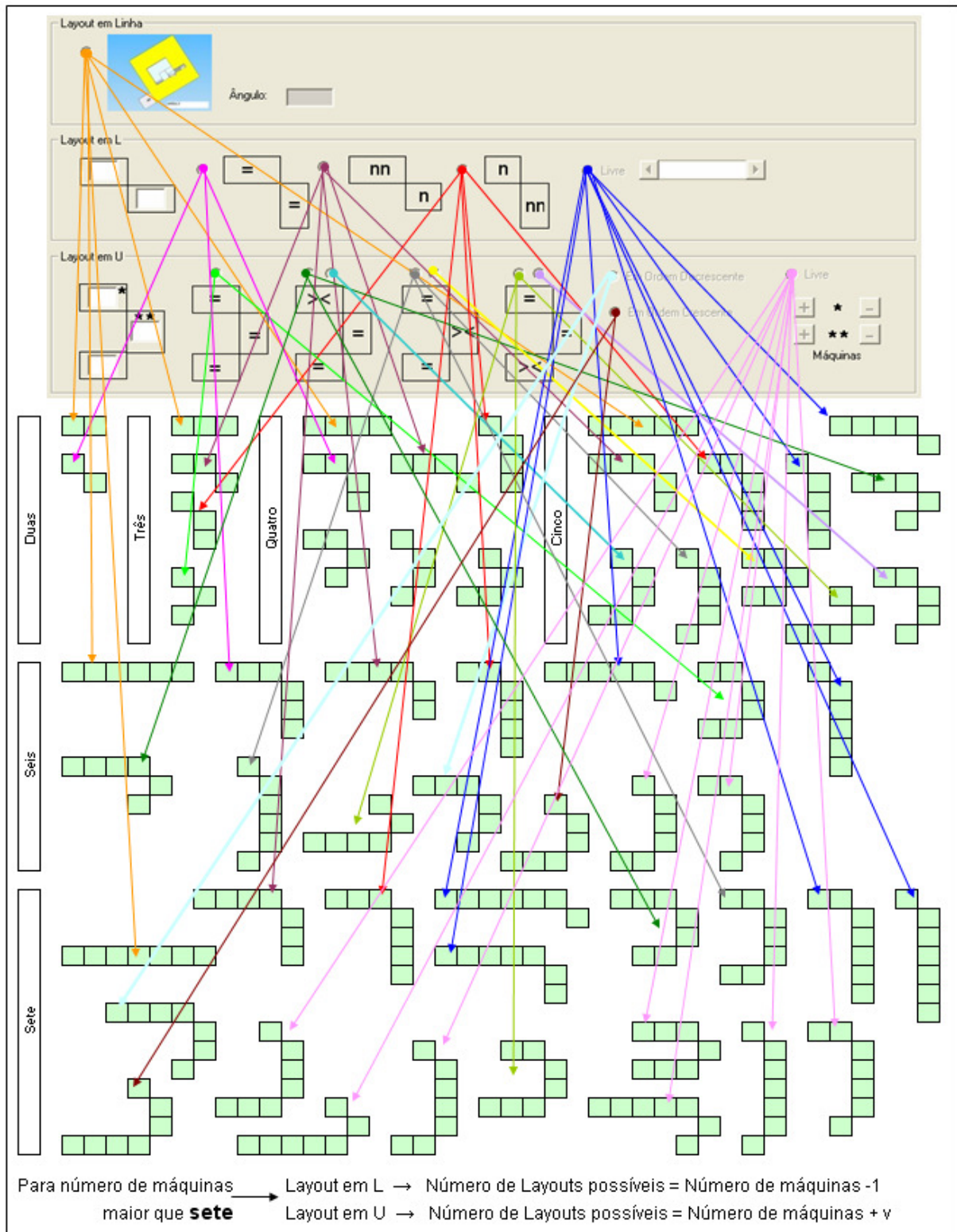


Figura 6.13 - Validação das configurações de fluxo

Para validar as configurações de fluxo relativo ao modelamento 3D, utilizou-se então um número maior de máquinas (nove), obtendo-se os resultados mostrados na Figura 6.14.

n° máq.		2	3	4	5
Tipo de Fluxo	Linha				
	"L"				
	"U"	---			
n° máq.		6	7	8	9
Tipo de Fluxo	Linha				
	"L"				
	"U"				

Figura 6.14 - Validação dos modelamentos 3D

Para validação do sistema aplicativo referente ao posicionamento das máquinas, elaborou-se o desenho 2D individual das máquinas utilizadas, conforme exemplo mostrado na Figura 6.15, onde as dimensões mínimas funcionais para cada máquina foram inseridas manualmente para a representação do “tapete virtual”.

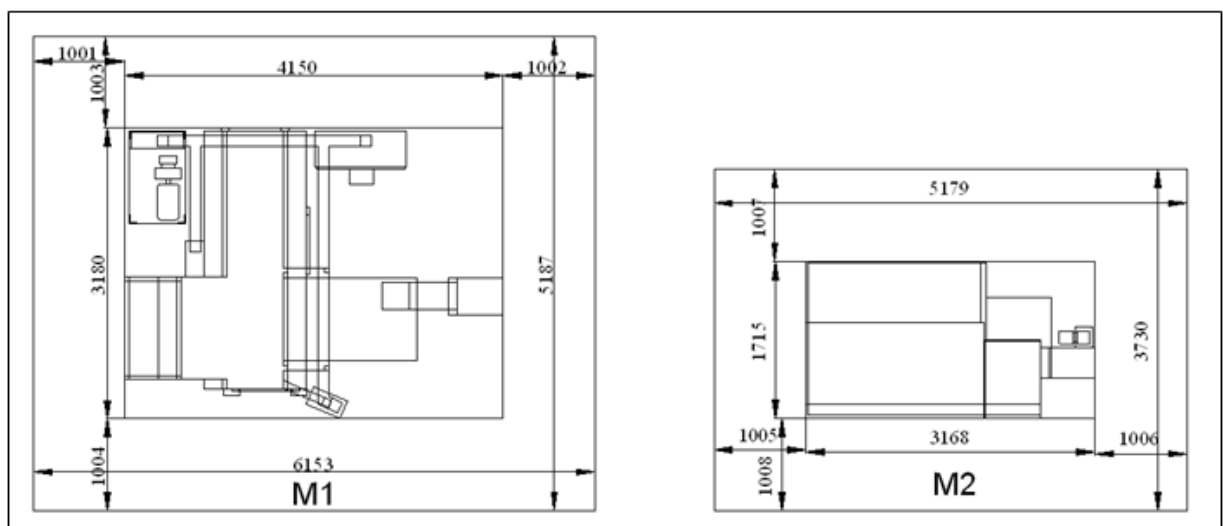


Figura 6.15 - Desenho em 2D da máquina M1 e M2

Em seguida utilizou-se o LayCel3D para gerar automaticamente o desenho 2D das células, conforme exemplo de célula com duas máquinas e fluxo em “L” mostrado na Figura 6.16.

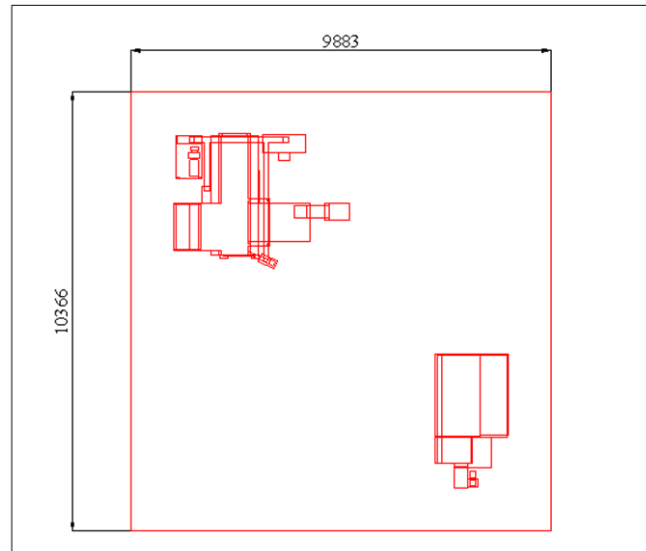


Figura 6.16 - Desenho de um Layout em “U” de duas máquinas – M1 e M2

Para validar o posicionamento das máquinas gerado pelo aplicativo, realizou-se a sobreposição dos desenhos elaborados manualmente em relação aos obtidos de forma automática pelo LayCel3D, tendo como resultado um desenho posicionado perfeitamente sobre o outro, comprovado pelas cotas mostradas na Figura 6.17.

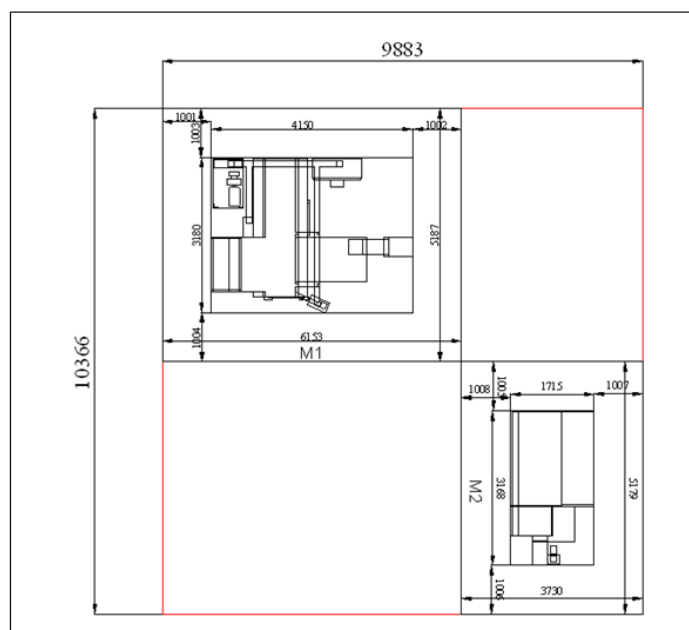


Figura 6.17 - Validação do posicionamento - Desenho com máquinas sobrepostas

Esta metodologia foi realizada para todas configurações de fluxo, em um total de trinta amostras com número de máquinas entre dois e dez, e todos apresentaram desenhos corretos. A Figura 6.18 ilustra uma amostra de validação com uma célula em “U” com seis máquinas.

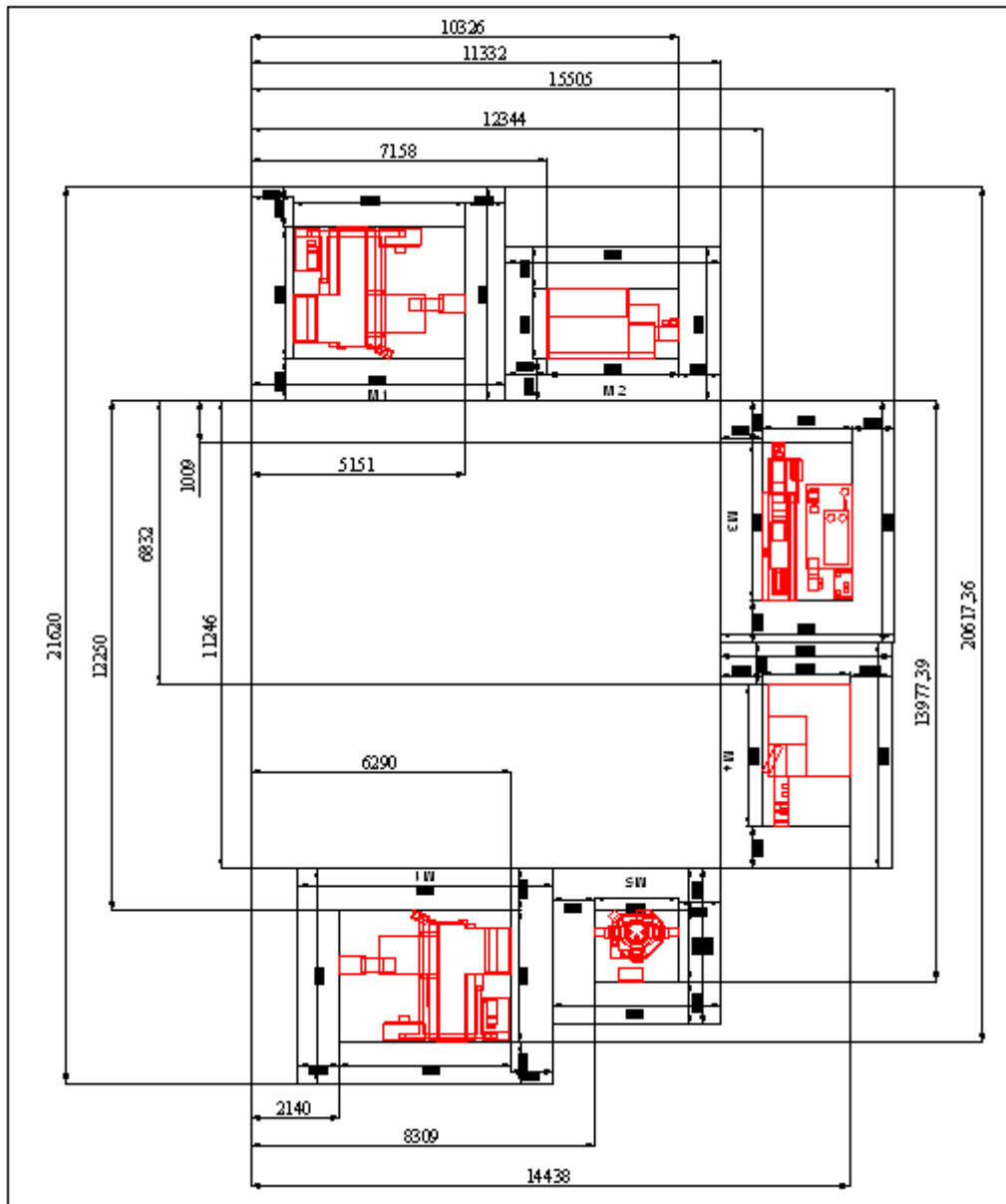


Figura 6.18 - Validação do algoritmo de posicionamento das máquinas

Para validação do aplicativo em relação à versão do SolidEdge[®] utilizada juntamente com o sistema operacional realizaram-se testes que foram registrados conforme ilustrado na Figura 6.19. Ajustes foram necessários na programação para atender a todas estas possibilidades.

Geração	Fluxo	Versão SolidEdge e Sistema Operacional utilizado					
		v.20 e XP Professional	v.20 e W7 64 Home Basic	ST e XP Professional	ST e W7 64 Home Basic	ST3 e W7 64 Home Basic	ST3 e W7 64 Professional
Automático Lee1997.mdb *2	Layout em Linha	ok	ok	ok	ok	ok	ok
	Layout em L	ok	ok	ok	ok	ok	ok
	Layout em U	ok	ok	ok	ok	ok	ok
Manual M1 M2 M3 M4 M5	Layout em Linha	ok	ok	ok	ok	ok	ok
	Layout em L	ok	ok	ok	ok	ok	ok
	Layout em U	ok	ok	ok	ok	ok	ok
Importação M1 M2 M3 M4 M5 M1 M2 M3 M4 M5	Layout em Linha	ok	ok	ok	ok	ok	ok
	Layout em L	ok	ok	ok	ok	ok	ok
	Layout em U	ok	ok	ok	ok	ok	ok

Figura 6.19 - Validação versão SolidEdge x Sistema Operacional

Na Figura 6.20 é ilustrado o modelamento automático de seis células utilizando SolidEdge ST3, que é a versão 2010, trabalhando com sistema operacional Windows 7 64bits *Professional*.

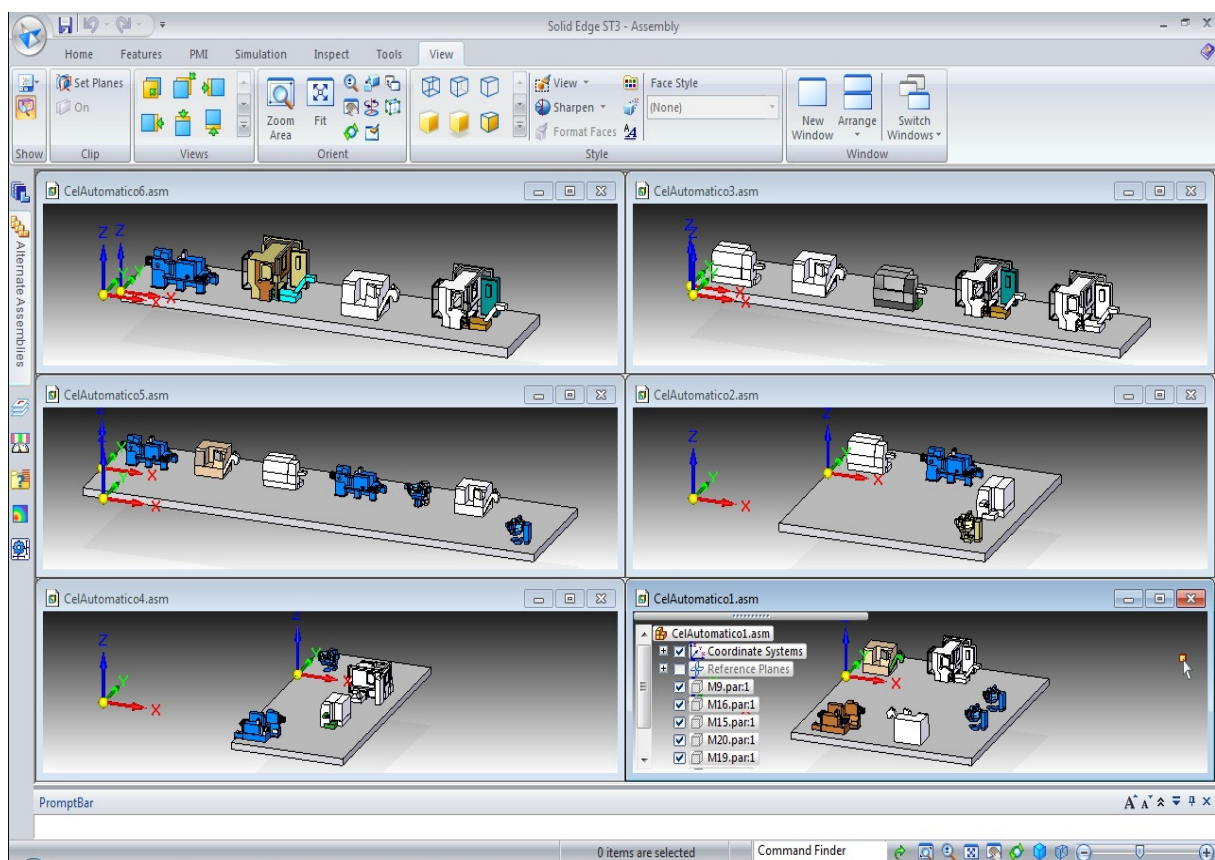


Figura 6.20 - Modelamento no SolidEdge versão ST3

7 CONCLUSÕES E SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS

Neste estudo desenvolveu-se um aplicativo para modelamento 3D de layout celular com base em tecnologia de grupo. Segundo a literatura pesquisada, em ambientes industriais com pequenos lotes e uma grande diversificação de produtos este é o tipo de layout mais indicado, trazendo benefícios aos ambientes de manufatura. A utilização de software para auxiliar na definição dos agrupamentos das peças e das máquinas em células é uma importante ferramenta de projeto.

Gerar um layout celular modelado em 3D de forma rápida resulta em ganhar tempo no planejamento do layout, evitando layout mal planejado, pois o custo de potenciais alterações de layout é muito grande comparado com o custo de planejamento. Esta metodologia também é útil para layout que necessite ser modificado em função de alteração de produto ou melhoria de processos que não tenha um rendimento maximizado. Outra aplicação é que projeto de layout não é um processo estático, pelo contrário, um projeto nunca tem uma solução perfeita, sempre pode ser melhorado, está em contínuo desenvolvimento. A utilização de estudos preliminares de layout, principalmente usando ambientes gráficos tridimensionais, permite alternativas de solução, buscando melhorias de produtividade, otimização operacional, racionalização de espaço físico, redução de custos para implantação/modificação de layout em função de planejamento bem realizado, ganhos de tempo na execução dos trabalhos em função do detalhamento das instalações, etc.

O aplicativo desenvolvido possui características que possibilitam sua utilização seja no ambiente acadêmico, no estudo de sistemas de fabricação, mas principalmente em âmbito industrial. Implementado com interface amigável possibilita ao usuário editar o modelo ou exportá-lo para outros ambientes gráficos, como também integrar-se em análise de aspectos ergonômicos, simuladores de fluxo de produção ou sistemas CAD para macro layout. Tem aplicação como ferramenta no planejamento e no projeto de layout, à medida que utiliza recursos de uma plataforma gráfica comercial (CAD) para representar, de modo automatizado, resultados de algoritmos que normalmente seriam apenas informações textuais. Representa uma ferramenta de auxílio à tomada de decisão em planejamento de layout de baixo custo, pois além do pequeno número de opções deste tipo específico de software no mercado, estes têm um custo muito elevado. No entanto, sua aplicação é justificada, pois os ganhos utilizando este tipo de simulação podem ser significativos.

A metodologia para definição das fronteiras das células, que identifica os agrupamentos automaticamente, não deixando a cargo do usuário, é outro ponto a destacar, pois na maioria dos trabalhos realizados anteriormente não estava prevista esta facilidade. Da mesma forma, este trabalho complementa outras aplicações [Lorini, 1993; Amantino, 2005; Balamurugan *et al.*, 2006; Boe e Cheng, 1991] realizados anteriormente que limitavam-se às definições de células, sem representá-las graficamente, além de possibilitar a escolha da forma de fluxo a ser assumida pela célula, representando um elemento importante para apoio a decisão a quem esteja projetando ou promovendo melhorias em um ambiente industrial.

Como sugestão de trabalhos futuros, tem-se: adição de novos algoritmos ao aplicativo para fornecer mais opções ao usuário; desenvolvimento de novas aplicações para a metodologia de programação do SolidEdge®; desenvolvimento de outras metodologias alternativas para definição das fronteiras das matrizes como aquela do sistema aqui proposto em que resulta em célula única; utilização de outros softwares de modelamento 3D como plataforma de representação gráfica deste aplicativo; validação e aplicação do sistema desenvolvido em projetos de formação de células em casos reais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Al-Ahmari, A.M.A. Part feature selection and family design in group technology using a fuzzy approach, **International Journal of Computer Applications in Technology**, v.21, n.3, p.129-136, 2004.

Alves, A.C. **Projecto Dinâmico de Sistemas de Produção Orientados ao Produto**, 354 p. Tese de Doutoramento em Engenharia de Produção e Sistemas - Escola de Engenharia - Universidade do Minho, Braga, 2007.

Amantino, E.B. **Sistema para Projeto de Célula de Manufatura: Definição de Agrupamentos**, 81 p. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica - Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, Porto Alegre, 2005.

Argoud, A.R.T.T. **Procedimento para projeto de arranjo físico modular em manufatura através de algoritmo genético de agrupamento**, 304 p. Tese de Doutorado em Engenharia Mecânica - Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

Babu, S.; Nandurkar, K.N.; Thomas, A. Development of virtual cellular manufacturing systems for SMEs, **Logistics Information Management**, v.13, n.4, p.228-242, 2000.

Baker, R.P.; Maropoulos, P.G. An automatic clustering algorithm suitable for use by a computer-based tool for the design, management and continuous improvement of cellular manufacturing systems, **Computer Integrated Manufacturing Systems**, v.10, n.3, p.217-230, 1997.

Balamurugan, K.; Selladurai, V.; Ilamathi, B. Design and optimization of manufacturing facilities layouts, **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers -- Part B -- Engineering Manufacture**, v.220, p.1249-1257, 2006.

Barbosa-Póvoa, A.P.; Mateus, R.; Novais, A.Q. Optimal two-dimensional layout of industrial facilities, **International Journal of Production Research**, v.39, p.2567-2593, 2001.

Barbosa-Póvoa, A.P.; Mateus, R.; Novais, A.Q. Optimal 3D layout of industrial facilities, **International Journal of Production Research**, v.40, p.1669-1698, 2002.

Boe, W.J.; Cheng, C.H. A close neighbor algorithm for designing cellular manufacturing systems, **International Journal of Production Research**, v.29, p.2097-2116, 1991.

Burbidge, J.L. **Group technology in the engineering industry**. Stephen Austin and Sons Ltd., Hertford, 1979.

Burbidge, J.L. The first step in planning group technology, **International Journal of Production Economics**, v.43, n.2-3, p.261-266, 1996.

Chan, C.-Y.; Lam, F.-W.; Lee, C.-P. Considerations for using cellular manufacturing, **Journal of Materials Processing Technology**, v.96, n.1-3, p.182-187, 1999.

Chan, F.T.S.; Lau, K.W.; Chan, P.L.Y.; Choy, K.L. Two-stage approach for machine-part grouping and cell layout problems, **Robotics and Computer-Integrated Manufacturing**, v.22, n.3, p.217-238, 2006.

Chawla, R.; Banerjee, A. An Automated 3D Facilities Planning and Operations Model Generator for Synthesizing Generic Manufacturing Operations in Virtual Reality, **Journal of Advanced Manufacturing Systems**, v.1, p.5-17, 2002.

Corrêa, H.L.; Corrêa, C.A. **Administração de produção e de operações: manufatura e serviços: uma abordagem estratégica**. 2. ed. Editora Atlas, São Paulo, 2006.

Drira, A.; Pierreval, H.; Hajri-Gabouj, S. Facility layout problems: A survey, **Annual Reviews in Control**, v.31, n.2, p.255-267, 2007.

Drolet, J.; Abdulnour, G.; Rheault, M. The cellular manufacturing evolution, **Computers & Industrial Engineering**, v.31, n.1-2, p.139-142, 1996.

Durmusoglu, M.B.; Nomak, A. GT cells design and implementation in a glass mould production system, **Computers & Industrial Engineering**, v.48, n.3, p.525-536, 2005.

Francis, R.L.; McGinnis, L.F.; White, J.A. **Facility layout and location: an analytical approach**. 2nd ed. Prentice Hall, Englewood Cliffs, N.J., 1992.

Goldberg, D.E. **Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning**. Addison-Wesley Pub. Co., Reading, Mass., 1989.

Gonçalves Filho, E.V.; Tiberti, J.A. A group genetic algorithm for the machine cell formation problem, **International Journal of Production Economics**, v.102, n.1, p.1-21, 2006.

Groover, M.P. **Automation, production systems and computer-integrated manufacturing**. 2nd ed. Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, 2001.

Hassan, M.M.D. Machine layout problem in modern manufacturing facilities, **International Journal of Production Research**, v.32, p.2559-2584, 1994.

Heragu, S. **Facilities design**. iUniverse Inc, Lincoln, NE, 2006.

Hicks, C. A genetic algorithm tool for designing manufacturing facilities in the capital goods industry, **International Journal of Production Economics**, v.90, n.2, p.199-211, 2004.

Hu, G.H.; Chen, Y.P.; Zhou, Z.D.; Fang, H.C. A genetic algorithm for the inter-cell layout and material handling system design, **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v.34, n.11, p.1153-1163, 2007.

Huq, F.; Hensler, D.A.; Mohamed, Z.M. A simulation analysis of factors influencing the flow time and through-put performance of functional and cellular layouts, **Integrated Manufacturing Systems**, v.12, n.4, p.285-295, 2001.

Irani, S.A.; Cavalier, T.M.; Cohen, P.H. Virtual manufacturing cells: exploiting layout design and intercell flows for the machine sharing problem, **International Journal of Production Research**, v.31, p.791-810, 1993.

Jain, L.C.; Martin, N.M. **Fusion of neural networks, fuzzy sets, and genetic algorithms : industrial applications**. CRC press, Boca Raton, 1998.

James, T.L.; Brown, E.C.; Keeling, K.B. A hybrid grouping genetic algorithm for the cell formation problem, **Computers & Operations Research**, v.34, n.7, p.2059-2079, 2007.

Joseph, T.P. Design of Lean work cells: a Lean lab layout (Part II), **MLO: Medical Laboratory Observer**, v.38, n.8, p.24-32, 2006.

Junior, T. **Layout: arranjo físico**. 8. ed. O&M Itys Fides, Mogi das Cruzes, 2004.

King, J.R. Machine-component grouping in production flow analysis: an approach using a rank order clustering algorithm, **International Journal of Production Research**, v.18, n.2, p.213, 1980.

King, J.R.; Nakornchai, V. Machine--component group formation in group technology: review and extension, **International Journal of Production Research**, v.20, n.2, p.117, 1982.

Lee, M.K.; Luong, H.S.; Abhary, K. A genetic algorithm based cell design considering alternative routing, **Computer Integrated Manufacturing Systems**, v.10, n.2, p.93-108, 1997.

Lorini, F.J. **Tecnologia de grupo e organização da manufatura**. Editora UFSC, Florianópolis, 1993.

Menegon, N.L.; Costa, M.A.B.D.; Camarotto; Camarotto, J.A. **A Abordagem utilizada pelo Grupo Simucad: Simulação & CAD, no desenvolvimento de Instalações Industriais**, ENEGEP, 1997.

Molleman, E.; Slomp, J.; Rolefes, S. The evolution of a cellular manufacturing system - a longitudinal case study, **International Journal of Production Economics**, v.75, n.3, p.305-322, 2002.

Moore, J.M. **Plant layout and design**. Macmillan, New York, 1970.

Morad, N.; Zalzal, A.M.S. **A genetic-based approach to the formation of manufacturing cells and batch scheduling**, Evolutionary Computation, 1996., Proceedings of IEEE International Conference on, p.485-490, 1996.

Olivério, J.L. **Projeto de Fábrica: Produtos, Processos e Instalações Industriais**. Instituto Brasileiro do Livro Científico Ltda, São Paulo, 1985.

Osman, H.M.; Georgy, M.E.; Ibrahim, M.E. A hybrid CAD-based construction site layout planning system using genetic algorithms, **Automation in Construction**, v.12, n.6, p.749-764, 2003.

Panchalavarapu, P.R.; Chankong, V. Design of cellular manufacturing systems with assembly considerations, **Computers & Industrial Engineering**, v.48, n.3, p.449-469, 2005.

Pandian, R.S.; Mahapatra, S.S. Manufacturing cell formation with production data using neural networks, **Computers & Industrial Engineering**, v.56, n.4, p.1340-1347, 2009.

Pemberton, A.W. **Arranjo físico industrial e movimentação de materiais**. Interciência, Rio de Janeiro, 1977.

Sadeghpour, F.; Moselhi, O.; Alkass, S.T. Computer-Aided Site Layout Planning, **Journal of Construction Engineering & Management**, v.132, p.143-151, 2006.

Selim, H.M.; Askin, R.G.; Vakharia, A.J. Cell formation in group technology: Review, evaluation and directions for future research, **Computers & Industrial Engineering**, v.34, n.1, p.3-20, 1998.

Siemens, www.siemens.com/plm, acessado em 18 de outubro de 2009.

Singh, N.; Rajamani, D. **Cellular Manufacturing Systems: Design, Planning and Control**. Chapman & Hall, London, 1996.

Slack, N.; Brandão, A.B.; Corrêa, H. **Administração da produção** edição compacta. Atlas, São Paulo, 1999.

Sly, D.P. Issues and Techniques for Using CAD to Draw Factory Layouts, **IIE Solutions**, v.28, n.3, p.14, 1996.

Süer, G.A.; Cosner, J.; Patten, A. Models for cell loading and product sequencing in labor-intensive cells, **Computers & Industrial Engineering**, v.56, n.1, p.97-105, 2009.

Tahara, C.S. **Arquitetura para integração de métodos para apoiar a decisão em formação de células de manufatura**, 162 p. - Tese de Doutorado em Engenharia Mecânica - Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2001.

Tariq, A.; Hussain, I.; Ghafoor, A. A hybrid genetic algorithm for machine-part grouping, **Computers & Industrial Engineering**, v.56, n.1, p.347-356, 2009.

Tiberti, A.J. **Desenvolvimento de software de apoio ao projeto de arranjo físico de fábrica baseado em um framework orientado a objeto**, 182 p. - Tese de Doutorado em Engenharia Mecânica - Universidade Federal de São Carlos - UFSCar, São Carlos, 2003.

Tompkins, J.A.; White, J.A.; Bozer, Y.A.; Etc **Facilities planning**. 2nd ed. Wiley, New York, 1996.

Torres, I. **Integração de ferramentas computacionais aplicadas ao projeto e desenvolvimento de arranjo físico de instalações industriais**, 154 p. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Produção - Universidade Federal de São Carlos - UFSCar, São Carlos, 2001.

Torres, I. **Um formalismo relacional para o desenvolvimento de Arranjo físico industrial**, 234 p. - Tese de Doutorado em Engenharia de Produção - Universidade Federal de São Carlos - UFSCar, São Carlos, 2007.

Tsai, C.-C.; Lee, C.-Y. Optimization of manufacturing cell formation with a multi-functional mathematical programming model, **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v.30, p.309-318, 2006.

Unigraphics, S.I. **Programmer's Guide** – Customizing Solid Edge™, Version 15, 250 p., 2004

Weller, T.R. **Proposta de uma abordagem de busca tabu para o layout de células de manufatura**, 148 p. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica e de Materiais - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2008.

Wemmerlöv, U.; Hyer, N.L. Cellular manufacturing in the U.S. industry: a survey of users, **International Journal of Production Research**, v.27, p.1511-1530, 1989.

Wilhelm, W.E.; Chiou, C.C.; Chang, D.B. Integrating design and planning considerations in cellular manufacturing, **Annals of Operations Research**, v.77, n.0, p.97-107, 1998.

Wilkins, D.A.; Mckew, H.J. CAD-Layered Record Drawings for Facility Management, **Engineered Systems**, v.19, n.12, p.70-76, 2002.

Wu, X.; Chu, C.-H.; Wang, Y.; Yue, D. Genetic algorithms for integrating cell formation with machine layout and scheduling, **Computers & Industrial Engineering**, v.53, n.2, p.277-289, 2007.

Zeleznikow, J.; Nolan, J.R. Using soft computing to build real world intelligent decision support systems in uncertain domains, **Decision Support Systems**, v.31, n.2, p.263-285, 2001.

MATERIAL CONSULTADO

Chesnut, D.; Berry, J.; Lock, S. **Microsoft Mastering: Enterprise Development Using Microsoft Visual Basic 6.0** Português: Recursos avançados de Microsoft Visual Basic 6.0: sem limites. Berkeley, São Paulo, 2000.

Holzner, S. **Visual Basic 6 Core Language Little Black Book** Português: Visual Basic 6: programação básica: Little Black Book. Ciência Moderna, Rio de Janeiro, 1999.

Lima, A.D.S. **Aplicações em Visual Basic 6: bancos de dados**. Érica, São Paulo, 1999.

Mason, J.C. **BASIC matrix methods**. Butterworths, London, 1987.

Mcmanus, J.P. **Database Access with Visual Basic 6** Português: Visual Basic 6 : banco de dados. Ciência Moderna, Rio de Janeiro, 1999.

Microsoft, C. **Microsoft Visual Basic 6.0 programmers's guide** Português: Microsoft Visual Basic 6.0: guia do programador. Makron, São Paulo, 1999.

Nunes, E. **Visual Basic 6.0: guia do usuário**. Makron Books, São Paulo, 1999.

Pereira, D.E. **Microsoft Visual Basic.net para programadores**. Makron Books, São Paulo, 2002.

Perry, G.M. **Aprenda em 21 dias Visual Basic 6**. Campus, Rio de Janeiro, 1999.

Siemens, P.L.M.S. **.NET Programmer's Guide - Solid Edge with Synchronous Technology API**, 196 p., 2008

Silva, L.C.D. **Banco de dados para WEB: do planejamento à implementação**. Érica, São Paulo, 2001.