

CENTRO UNIVERSITÁRIO DA FEI

BRUNO BLOISE

**O USO DA SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL COMO FERRAMENTA DE APOIO À
DECISÃO, COMPLEMENTAR AO PROJETO DE LAYOUT VISANDO
PRODUTIVIDADE DO SISTEMA EM ESTUDO**

São Bernardo do Campo,

2010

BRUNO BLOISE

**O USO DA SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL COMO FERRAMENTA DE APOIO À
DECISÃO, COMPLEMENTAR AO PROJETO DE LAYOUT VISANDO
PRODUTIVIDADE DO SISTEMA EM ESTUDO**

Dissertação de Mestrado apresentada ao
Centro Universitário da FEI, para obtenção do
título de Mestre em Engenharia Mecânica,
Área de Produção, orientado pelo Prof. Dr.
Alexandre Augusto Massote

São Bernardo do Campo,

2010

Bloise, Bruno

O uso da simulação computacional como ferramenta de apoio à decisão, complementar ao projeto de layout visando produtividade do sistema em estudo / Bruno Bloise. São Bernardo do Campo, 2010.

105 f. : il.

Dissertação - Centro Universitário da FEI.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Augusto Massote

1. Layout. 2. Pesquisa Operacional. 3. Simulação. I. Massote, Alexandre Augusto, orient. II. Título.

CDU 65.012.25



Centro Universitário da **FEI**

APRESENTAÇÃO DE DISSERTAÇÃO ATA DA BANCA JULGADORA

PGE- 10

Programa de Mestrado de Engenharia Mecânica

Aluno: Bruno Bloise

Matrícula: 207113-2

Título do Trabalho: O uso da simulação computacional como ferramenta de apoio à decisão complementar ao projeto de layout visando produtividade do sistema em estudo.

Área de Concentração: Produção

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Augusto Massote

Data da realização da defesa: 31 / maio / 2010

A Banca Julgadora abaixo-assinada atribuiu ao aluno o seguinte:

APROVADO

REPROVADO

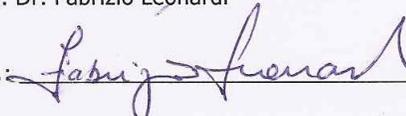
São Bernardo do Campo, 31 / 05 / 2010

MEMBROS DA BANCA JULGADORA

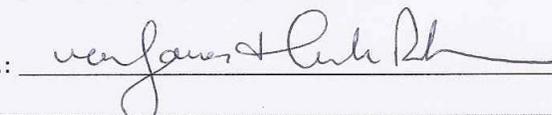
Prof. Dr. Alexandre Augusto Massote

Ass.: 

Prof. Dr. Fabrizio Leonardi

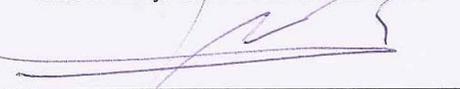
Ass.: 

Prof. Dr. Walter Gomes da Cunha Filho

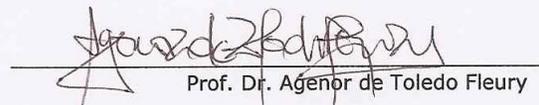
Ass.: 

VERSÃO FINAL DA DISSERTAÇÃO

**ENDOSSO DO ORIENTADOR APÓS A INCLUSÃO DAS
RECOMENDAÇÕES DA BANCA EXAMINADORA**



Aprovação do Coordenador do Programa de Pós-graduação


Prof. Dr. Agenor de Toledo Fleury

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Alexandre Augusto Massote;

Aos colegas Bruno Alvarez e José Nicodemos;

Ao Prof. Paulo Renato Alt, *in memoriam*.

RESUMO

Dentre as técnicas quantitativas utilizadas como ferramentas de apoio à decisão, fornecidas pelos estudos e aplicações da Pesquisa Operacional, a Simulação vem ganhando destaque e está sendo cada vez mais utilizada em empreendimentos. Isto ocorre devido à capacidade de modelagem e à geração de diferentes cenários em um espaço de tempo reduzido. O uso da simulação computacional também possibilita e auxilia a tomada de decisão de forma rápida e econômica, evitando experimentações em campo ou no sistema real em estudo. Desperdícios na escolha e no dimensionamento dos recursos utilizados, nos investimentos em máquinas e equipamentos, e nas instalações que abrigam a operação são evitados. Além disto, é uma ferramenta que tem demonstrado grande flexibilidade e eficácia na solução de problemas que envolvem uma grande quantidade de variáveis que por esta característica são de difícil abordagem matemática otimizante e muitas vezes computacionalmente inviável. Para a Engenharia de Produção, um dos tópicos importantes que influenciam diretamente os resultados de um empreendimento, consiste no projeto de layout. Dada a visão sistêmica requerida pelos atuais processos na cadeia produtiva, bem como a dinâmica imposta pelos competidores no mercado, e o enfoque na gestão da cadeia de suprimentos e dos elos que a compõe, estes fatos somados impõem mudanças nas estruturas corporativas em intervalos de tempo ou ciclos cada vez menores. O presente estudo mostra a utilização da simulação computacional como ferramenta complementar aos métodos tradicionais em projeto de layout, bem como a influência direta que variáveis operacionais de difícil modelamento exercem na produtividade de plantas de manufatura, mesmo em pequenos empreendimentos ou em subsistemas.

Palavras chave: Layout; Pesquisa Operacional; Simulação.

ABSTRACT

Among the quantitative techniques used as tools for decision support provided by the studies and applications of Operational Research, Simulation has been gaining attention and is being increasingly used in enterprises. This is due to the ability of modeling and the generation of different scenarios in a short period of time. The use of computer simulation also enables and assists decision-making quickly and economically, avoiding trials in the field or in the real system under study. Waste in choosing and sizing of resources, investment in machinery and equipment, and facilities housing the operation are avoided. Moreover, it is a tool that has demonstrated great flexibility and efficiency in solving problems that involve a lot of variables that for this feature, are difficult to approach mathematical optimizing and often computationally infeasible. For Production Engineering, one of the important topics that directly influence the outcome of an enterprise is the layout design. Given the systemic vision required by the current processes in the production chain as well as the dynamics imposed by the competitors in the market, and the focus on supply chain management and the links that comprise it, these facts together impose changes in corporate structures at time intervals or increasingly smaller cycles. The present study shows the use of computer simulation as a complementary tool to traditional methods in layout design as well as the direct influence of operating variables, which are difficult to model, on the productivity of manufacturing plants, even in small enterprises or subsystems.

Keywords: Layout; Operational Research; Simulation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -Exemplo estação de trabalho.....	24
Figura 2 - Sistema de procedimentos SLP;	26
Figura 3 - Exemplo de carta de inter-relações não baseado em fluxo.	27
Figura 4 - Carta de inter-relações	28
Figura 5 - Processo básico de fila	51
Figura 6 - Carta de processos múltiplos.....	60
Figura 7 - Diagrama de fluxos ou intensidade de movimentação entre estações.....	61
Figura 8 - Disposição adotada das estações na planta	62
Figura 9 - Alocação inicial (exemplo)	63
Figura 10 - Montagem do arranjo inicial	66
Figura 11 - Layout inicial.....	67
Figura 12 - Layout do Cenário “A”	70
Figura 13 - Simulação do Cenário “A” com estoques das estações para até 10 unidades.....	71
Figura 14 - Layout do Cenário “B”.....	81
Figura 15 - Layout do Cenário “C”.....	82
Figura 16 - Estação de trabalho, rotas alternativas.	88

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Sequência e tempos de operação por componente em minutos.....	58
Tabela 2 - Intensidade de movimentação entre setores.....	60
Tabela 3 - Carta De / Para	61
Tabela 4 - Valores da função objetivo e das variáveis.....	65
Tabela 5 - Componentes no sistema e saídas com capacidade de 10 componentes para cada EEMj.	71
Tabela 6 - Componentes no sistema e saídas com capacidade de 26 componentes para cada EEMj.	72
Tabela 7 - Aproveitamento das máquinas com estoques das estações de até 26 unidades.....	73
Tabela 8 - Dados de ocupação dos estoques com EEMj de 26 unidades.....	73
Tabela 9 - Dados de utilização das máquinas com EEM4 de 110 unidades.	74
Tabela 10 - Dados de ocupação dos estoques com EEM4 de 110 unidades.	74
Tabela 11 - Dados de utilização das máquinas com EEM2, EEM3 e EEM4 de 110 unidades.	75
Tabela 12 - Dados de ocupação dos estoques com EEM2, EEM3 e EEM4 de 110 unidades.	75
Tabela 13 - Dados de utilização das máquinas com EEM2, EEM3, EEM4 e EEM5 de 110 unidades.....	76
Tabela 14 - Dados de ocupação dos estoques com EEM2, EEM3, EEM4 e EEM5 de 110 unidades.....	76
Tabela 15 - Dimensionamento final dos estoques intermediários.	77
Tabela 16 - Aproveitamento dos operadores com 5 pessoas.....	78
Tabela 17 - Aproveitamento dos operadores com 6 pessoas.....	78
Tabela 18 - Aproveitamento dos operadores com 4 pessoas.....	78
Tabela 19 -Tempos consumidos e ganhos de produtividade.....	83
Tabela 20 - Área ocupada na planta e ganhos de produtividade.	84
Tabela 21 - Tempos consumidos e ganhos de produtividade com estoques reduzidos para 26 unidades.....	85
Tabela 22 -Tempos consumidos e ganhos de produtividade para todos cenários.	85
Tabela 23 - Ocupação máxima dos estoques intermediários.	86

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Abordagens tradicionais	31
Quadro 2- Modelos matemáticos.....	32
Quadro 3 - Algoritmos	33
Quadro 4 - Softwares	34
Quadro 5 - Softwares modulares	35
Quadro 6 - Heurísticas avançadas.....	36
Quadro 7 - Lógica <i>Fuzzy</i>	37

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	8
LISTA DE TABELAS.....	9
LISTA DE QUADROS	10
1 - APRESENTAÇÃO	13
1.1 - Introdução	13
1.2 - Objetivos.....	15
1.3 - Perguntas a serem respondidas.....	16
1.4 - Justificativa.....	17
1.5 - Abrangência.....	17
1.6 - Metodologia	18
1.7 - Organização do trabalho.....	20
2 - LAYOUT.....	21
2.1 - Projeto de layout por processo.....	21
2.2 - Informações necessárias ao projeto de layout	23
2.3 - Abordagem tradicional para projeto de layout.....	24
2.4 - Sistema SLP de Muther.....	26
2.5 - Modelamento em projeto de layout	28
2.6 - Outras abordagens para o problema de layout.....	29
2.7 - Resumo e discussão das abordagens	30
3 - SISTEMAS DE MANUFATURA E PRODUTIVIDADE	38
3.1 - Operações	38
3.2 - Processo de transformação.....	39
3.3 - Sistemas de manufatura	40
3.4 - Produtividade das operações.....	41
4 - SIMULAÇÃO	43
4.1 - Pesquisa operacional e simulação	43
4.2 - Aplicações da simulação computacional.....	45

4.3 - Quando simular?	47
4.3.1 - Sistemas determinísticos	48
4.3.2 - Sistemas estocásticos	48
4.4 - Simulação de eventos discretos	49
4.5 - Simulação contínua	49
4.6 - Filas de espera	50
4.7 - Simulação usando <i>ProModel</i>	53
5 - DESENVOLVIMENTO DO ESTUDO	55
5.1 - Produtos e quantidades considerados nos cenários analisados	56
5.2 - Processos de cada componente	57
5.3 - Elaboração do layout inicial	59
5.3.1 - Carta de processos múltiplos	59
5.3.2 - Intensidade de movimentação entre atividades	60
5.3.3 - Carta de / para.....	61
5.3.4 - Escolha e aplicação do procedimento	62
5.4 - Criação do modelo inicial no simulador <i>ProModel</i>	67
5.4.1 - Verificação da necessidade de estoques intermediários.....	70
5.4.2 - Dimensionamento dos estoques intermediários	72
5.4.3 - Dimensionamento do número de operadores	77
5.5 - Geração de cenários alternativos do modelo	79
5.6 - Análise comparativa das produtividades parciais	82
5.7 - Outros parâmetros de decisão	84
5.8 - Discussão dos resultados obtidos	87
6 - CONCLUSÕES	90
REFERÊNCIA BIBLIOGRAFICA	92
BIBLIOGRAFIA ADICIONAL	93
APÊNDICE	99

1 - APRESENTAÇÃO

1.1 - Introdução

O Arranjo Físico ou Layout consiste basicamente na disposição de objetos, em uma área definida. Pode-se citar como exemplo uma planta de apartamento em que podemos visualizar a disposição da mobília arranjada de diferentes formas em cada cômodo, ou área disponível.

Projeta-se a área de cada cômodo e sua disposição na planta, levando-se em conta a movimentação das pessoas, a privacidade desejada, a iluminação, a ventilação, o conforto e o tipo de utilização. Portanto, pode-se afirmar que a disposição e o tamanho dos cômodos são parte do arranjo físico desejado.

Assim, o layout possibilita a visualização prévia de condições do ambiente estudado. Numa residência, pode-se visualizar o melhor arranjo da mobília em função da estética. Um posto de abastecimento de combustível deve apresentar um layout que favoreça o acesso de veículos às bombas e também permita seu fluxo contínuo, bem como deve prever os espaços em que os frentistas se deslocam para prestar o serviço. Um supermercado necessita de um layout que possibilite a exposição de todos os produtos à venda, e que além de possibilitar a movimentação de carrinhos de compra e das pessoas com o maior conforto possível, também permita o deslocamento dos fornecedores.

São inúmeros os exemplos de aplicação de estudo de layout, como se conclui através de simples observação. Especialmente nos setores de manufatura e de prestação de serviços, é fato a necessidade de planejamento das áreas de trabalho e de atendimento. A sonegação deste implica em má condição de trabalho, mau atendimento ao público consumidor, prejuízos em qualidade e produtividade, custos elevados de movimentação de materiais e/ou produtos em função de deslocamentos desnecessários, etc.

A indústria vem evoluindo em suas técnicas e práticas a mais de um século, e quando se pensa que foi conquistado o “estado da arte”, novas técnicas e novas contingências fazem com que sistemas antes consagrados sejam descartados ou modificados, determinando reformulações de ações de forma a garantir a sobrevivência do negócio.

As mudanças do ambiente competitivo, especialmente com o advento da globalização, impõem uma dinâmica agressiva na atualidade. Em concordância com vários autores, SLACK e LEWIS (2003), afirmam que uma infinidade de informações, provenientes dos consumidores, dos competidores, dos ambientes regionais, dos desenvolvimentos tecnológicos e de cada componente individual integrado às correntes de valor, etc., precisam ser analisadas e traduzidas para o interior das instituições produtivas para que estas decidam estrategicamente quais serão seus próximos passos.

A melhor adequação das instalações ao seu produto ou aos processos que executa, traz menores custos e ganhos em produtividade, ou seja, torna a empresa mais competitiva.

HERAGU (2006) é ainda mais enfático sobre a importância do planejamento de instalações, ao argumentar que na atualidade as empresas gastam expressivo montante de tempo e dinheiro no desenho ou re-desenho de suas plantas. Esta é uma função extremamente importante que deve ser abordada antes de produtos serem produzidos ou de serviços serem prestados. Um desenho medíocre custa um montante significativo e resulta em qualidade sofrível, baixa estima dos colaboradores e em clientes insatisfeitos.

O simples rearranjo de um sistema de manufatura pode se traduzir em ganhos de produtividade significativos, comparados com o investimento realizado. Para atender a um aumento da demanda, gestores podem optar pelo aumento de horas trabalhadas, e/ou pela aquisição de novas máquinas, e/ou pela aquisição de novas tecnologias de processos, de automação e até mesmo de movimentação de materiais. Os gestores deveriam analisar inicialmente se os recursos existentes estão sendo utilizados de maneira eficiente. O layout da instalação é determinante no efetivo aproveitamento de recursos e equipamentos de manufatura, e a simulação computacional é uma forma experimental de medir resultados antes da implementação de um projeto de arranjo ou rearranjo físico.

Segundo HERAGU (2006), os problemas de layout são complexos devido a um grande número de fatores que devem ser analisados e mensurados sob uma hierarquia de informações de produtos e processos, bem como dos meios de movimentação, entre outros. O dimensionamento de cada um destes fatores e a interação entre cada uma das informações devem conduzir a um arranjo físico que seja capaz de abrigar e suportar de forma eficiente e econômica as tarefas de manufatura previstas para o sistema.

Para HILLIER e LIEBERMAN (2006), isto envolve o levantamento e a modelagem de sistemas, quantificados pela geração de equações que considerem todas as variáveis que exercem influência. Além disso, devem ser consideradas as influências e interações de outros parâmetros envolvidos.

Além da dificuldade inicial em se elaborar o modelo por programação matemática e o fato de que estes modelos não conseguem incorporar comportamentos estocásticos de forma adequada, o cálculo combinatorial necessário para encontrar a melhor solução, ou solução ótima, também é complexo e na maioria das vezes redonda em problemas Não Polinomiais completos (NP – completos) que exigem extenso tempo de processamento computacional, que eventualmente inviabilizam a solução.

Neste estudo são mostrados os procedimentos utilizados nas ultimas décadas para projetos de layout, e também diferentes métodos para obter soluções de modelos complexos através de heurísticas, de programas computacionais e do uso de outras técnicas em desenvolvimento.

Para HERAGU (2006), um modelo matemático requer uma função objetivo que quantifica a influência de cada variável no sistema, sujeito a equações de restrição que determinam o universo, ou os limites em que o sistema deve operar. Mesmo que a solução ótima não possa ser calculada, o modelo matemático serve para avaliar e comparar possíveis soluções geradas por métodos diversos, simplesmente calculando-se o valor da função objetivo para os parâmetros inseridos oriundos das heurísticas.

Esta medição de quanto uma solução alternativa é boa em relação a uma anterior obtida por algum algoritmo, constitui o parâmetro para o desenvolvimento e pesquisa de novas heurísticas. Segundo HERAGU (2006), exceto para problemas muito pequenos, não há como se obter soluções ótimas para o problema de layout, e sim, através do uso de diversas técnicas, é possível aprimorar uma solução inicial que pode resultar em uma nova solução boa ou quase ótima.

1.2 - Objetivos

O objetivo principal deste estudo é verificar se a simulação é uma ferramenta adequada para propiciar melhorias em um layout inicial obtido com a aplicação: dos métodos de levantamento e tratamento de dados do sistema SLP de MUTHER (1978); do conceito de minimização de custos de movimentação apresentado por SLACK et al (2002); e do modelamento matemático deste conceito como proposto por HERAGU (2006), utilizando como critério de comparação a produtividade de cada um dos layouts.

Já os objetivos específicos a serem atingidos são:

- Mostrar a influência do layout na produtividade de sistemas de manufatura;
- Mostrar que variáveis importantes tais como, sequências de processos, tempos de processamento, necessidade de estoques intermediários, capacidade dos estoques, políticas de planejamento, entre outras, deveriam ser consideradas pelas técnicas usuais para o projeto de layout por influenciarem diretamente a produtividade;
- Verificar a flexibilidade da simulação para considerar estas variáveis nos projetos de layout.

1.3 - Perguntas a serem respondidas

Para que os objetivos sejam atingidos, este estudo procura responder as seguintes questões:

- O simples arranjo físico, ou a alocação de equipamentos de manufatura em determinadas posições relativas entre si, e as distâncias em que foram dispostos na planta, poderia influenciar as operações e a produtividade deste sistema de transformação?
- A decisão de não se alocar estoques intermediários de produtos entre diferentes processos de transformação sempre é a ideal para qualquer sistema de manufatura?
- Como dimensionar a quantidade de equipamentos de manufatura necessários em um sistema que deve transformar diferentes produtos que demandam por diferentes sequências de processos com distintos tempos de execução, com auxílio de simulação, visto que isto não é considerado na abordagem tradicional apresentada por SLACK et al (2002)?
- Como quantificar a necessidade de recursos de operação e de movimentação de materiais auxiliado pela simulação, também não considerada na abordagem tradicional?

1.4 - Justificativa

Em oposição aos sistemas de produção em massa, os *jobshops* podem produzir diferentes componentes, em pequenas e diversas quantidades, com diferentes sequências de processos e com tempos de processamento distintos. É obvio que esta operação é não balanceada, e por isso podem ocorrer filas de espera por processo, estoques intermediários, equipamentos ociosos, etc. O planejamento deve focar não só a melhor utilização dos recursos envolvidos, mas também o fluxo de pessoas, de insumos, de produtos, etc.

Buscou-se utilizar a simulação neste estudo pela sua grande flexibilidade em modelar problemas que podem ser caracterizados como problemas de fila, pelo potencial de se considerar um grande número de variáveis na formulação do problema e também pela facilidade de aplicação através de softwares específicos de simulação de uso amigável, de grande capacidade e preços cada vez mais acessíveis.

1.5 - Abrangência

Este estudo limita-se a propor a simulação como complemento às técnicas consagradas para o projeto de layout, que focam gerar minimização de custos de movimentação de materiais. Parte de um layout inicial de um sistema de manufatura fictício obtido com a aplicação do sistema SLP de MUTHER (1978) para coleta e organização dos dados, do conceito proposto por SLACK et al (2002) de minimização de custos de movimentação de materiais e do modelamento matemático deste conceito, indicado por HERAGU (2006).

São esperadas variações de desempenho do sistema de manufatura quando sujeito a configurações diferentes de arranjo físico. O mix de produtos, a quantidade de cada produto, o sequenciamento de processos de cada produto, os tempos de processos de cada produto, as velocidades de traslado, os meios de movimentação, e as máquinas utilizadas constituem parâmetros que não sofrem nenhuma alteração em todos os experimentos realizados. São introduzidas variações das posições relativas das máquinas no arranjo físico, das distâncias entre estas, e dos trajetos em que os materiais são movimentados, caracterizando cenários alternativos do modelo.

A cada cenário alternativo são coletados dados de desempenho. A experimentação sucessiva de diferentes cenários que agregam modificações em seu layout pode conduzir ao aumento de desempenho do sistema, e, se isto ocorrer, serão medidos alguns ganhos em produtividade através da comparação dos resultados dos modelos simulados.

1.6 - Metodologia

Para SAMPIERI et al (2006), o estudo científico tem como objetivos principais produzir conhecimento teórico e propor soluções para problemas reais. Trata-se de um processo de pesquisa para conhecer e investigar determinado fenômeno, que envolve coleta e análise de dados e que resulta em um relatório ou estudo. Dependendo da natureza dos dados coletados, e das análises que estes sofrerão no estudo, este pode ser elaborado sob o enfoque quantitativo e/ou qualitativo. A abordagem qualitativa é focada na compreensão de determinado fenômeno, de como este ocorre e de quais fatos o caracterizam, por interpretação. A abordagem quantitativa caracteriza um fenômeno em parâmetros ou variáveis numéricas que exercem influência no sistema. Analisa as inter relações entre estas variáveis e testa diferentes parâmetros para estas variáveis por meio de modelagem matemática, de estatística ou de simulação, de cujos resultados permitam verificar o comportamento do sistema estudado.

Neste estudo, as variáveis a serem consideradas na modelagem matemática otimizante e no modelo de simulação consistem de parâmetros numéricos que definem o comportamento do sistema. Portanto, este estudo é caracterizado por uma abordagem quantitativa.

Sabe-se que os estudos mais comuns em engenharia de produção são os teórico-conceituais, estudo de caso, *surveys*, modelamento e simulação, pesquisa-ação, pesquisa bibliográfica e pesquisa experimental segundo MIGUEL (2007).

O desenvolvimento teórico-conceitual envolve modelagens conceituais que resultam em novas teorias, mas também pode advir da discussão de conceitos da literatura ou de revisões bibliográficas conforme BERTO e NAKANO (2000 apud MIGUEL, 2007).

O estudo de caso consiste na investigação de determinado fenômeno, visando esclarecer o motivo ou motivos pelos quais uma ou várias decisões foram tomadas, como foram implementadas e quais os resultados foram alcançados segundo YIN (2001 apud MIGUEL, 2007).

Uma *survey* abrange o levantamento de dados em uma amostra significativa, relativa a um problema a ser estudado com o objetivo de se obter conclusões a respeito destes dados por meio de análise quantitativa, conforme GIL (1996 apud MIGUEL, 2007). Esta análise permite verificar a importância, a descrição e a distribuição de determinado fenômeno em uma população como subsídio para outros estudos.

O modelamento consiste no uso de técnicas matemáticas para descrever o funcionamento de um sistema ou parte de um sistema produtivo segundo BERTO e NAKANO (2000 apud MIGUEL, 2007). Como complemento, o uso da simulação permite investigar a relação causal e quantitativa entre variáveis de determinado sistema, conforme BERTRAND e FRANSOO (2002 apud MIGUEL, 2007).

A pesquisa-ação assemelha-se ao estudo de caso, porém é conduzido em tempo real, com participação ou cooperação efetiva do pesquisador. O objetivo é o de solucionar determinado problema, ou de aprimorar o funcionamento de determinado sistema existente efetuando mudanças e medindo resultados. Pode lidar com dados quantitativos, qualitativos ou ambos simultaneamente.

Revisões de literatura permitem conhecer e acompanhar o desenvolvimento de estudos sobre determinado tema ou determinadas áreas de conhecimento conforme NORONHA e FERREIRA (2000 apud MIGUEL, 2007).

Ainda para MIGUEL (2007), pesquisas experimentais tratam do estudo de relações causais entre duas ou mais variáveis de um sistema sob condições controladas pelo pesquisador, geralmente em laboratório. As variáveis são manipuladas e controladas pelo pesquisador, que observa os efeitos que estas manipulações produzem no sistema estudado.

A simulação computacional envolve experimentações em um modelo de algum sistema criado em computador. Segundo PIDD (2004), o modelo é usado como um veículo de experimentação capaz de mostrar os efeitos da adoção de diferentes políticas, que podem ser implementadas ou não, dependendo dos resultados obtidos no modelo, e por ser computacional, este modelo pode ser reproduzido com perfeição extrema, muito acima do que se poderia esperar de experimentos físicos reais que estão sujeitos a uma série de imprevisibilidades e limitações em se tratando de sua reprodução.

Portanto, este estudo pode ser caracterizado como quantitativo e pesquisa experimental.

1.7 - Organização do trabalho

Este trabalho está organizado em seis capítulos:

No primeiro capítulo são apresentados: uma breve introdução, o objetivo principal e objetivos secundários deste estudo, a justificativa e motivações para escolha do tema, a delimitação do estudo, a metodologia aplicada e organização.

O segundo apresenta métodos tradicionais para projeto de layout. Também apresenta uma série de quadros sinópticos contendo algumas das várias técnicas desenvolvidas para modelamento, aprimoramento e de busca de soluções para o problema de layout.

Conceitos básicos sobre a manufatura e a produtividade de sistemas fazem parte do terceiro capítulo que foi inserido neste estudo com o objetivo da compreensão básica das medições de desempenho que foram utilizadas no experimento.

O quarto capítulo conceitua a simulação como parte integrante da pesquisa operacional. Justifica sua utilização complementar à modelagem de sistemas pela capacidade de simular comportamentos de filas e de lidar com variáveis estocásticas em comparação com modelos determinísticos gerados por programação linear. Também é apresentado o software específico para simulação *ProModel*, utilizado no experimento.

O quinto apresenta o estudo proposto, no qual primeiramente foi concebido um layout inicial para um sistema fictício de manufatura através do emprego da técnica SLP para levantamento e tratamento de informações concebido por MUTHER (1978), da aplicação do conceito de minimização de custos de movimentação indicado por SLACK et al (2002) e do modelamento matemático proposto por HERAGU (2006). Este layout inicial fictício foi introduzido no software *ProModel*, configurando um modelo inicial para simulação, através do qual foram efetuadas experimentações com modificações em parâmetros que influenciam o layout. A geração de cenários alternativos a cada modificação de parâmetros de layout deve prover diferentes resultados de desempenho, de forma a orientar quais decisões devem ser implementadas ou não ao modelo que resultem em aumento da produtividade.

O sexto capítulo contém as conclusões, a discussão dos resultados obtidos com o estudo exposto no quinto capítulo, e as considerações e sugestões para estudos futuros

2 - LAYOUT

O planejamento de instalações, ou *Plant Layout*, tem sido objeto de pesquisas e estudos desde meados dos anos 1950, porém só a partir do início da década de 1990 assume a devida importância.

Embora concebido inicialmente como uma ciência, com o recente aumento da globalização dos mercados, o planejamento de instalações passou a constituir uma ferramenta de estratégia competitiva.

2.1 - Projeto de layout por processo

Em sistemas operacionais normalmente se utilizam de diferentes processos de transformação em diferentes sequências, seja na produção de bens manufaturados ou serviços. Por exemplo, a fabricação de uma engrenagem pode requerer transformações distintas em sequência, como: corte do material, torneamento, fresamento de dentes, furação, têmpera e retificação. Estas transformações são realizadas utilizando equipamentos distintos específicos para determinado tipo de processo, o que implica na movimentação dos produtos entre processos alocados em diferentes pontos da planta. Estes fluxos intrincados caracterizam o arranjo físico do tipo por Processo, conforme SLACK et al. (2002).

O projeto deste tipo de arranjo envolve um grande número de alternativas, fato que o torna complexo. Para entender-se esta afirmação basta que se considere que quando existem duas estações de trabalho há apenas duas formas de arranjá-las uma em relação à outra. Para três centros há seis diferentes combinações, para quatro centros há vinte e quatro arranjos, e assim por diante. Ainda segundo SLACK et al (2002), para N centros há N fatorial ($N!$) combinações que determinam arranjos diferentes, e por este motivo soluções ótimas são difíceis de ser encontradas mesmo para pequenos sistemas de manufatura.

Para MUTHER (1978), o processo de planejamento de instalações não é uma ciência exata, mas sim a sistematização de diversas e intrincadas informações que compõem variáveis que devem ser consideradas no todo. Estas informações devidamente

organizadas e sistematizadas geram respostas que compõem o *output* do processo de planejamento, fornecendo uma base para construção do layout.

MUTHER (1978) estabelece uma sequência hierárquica de procedimentos de coleta e tratamento de informações que resultam em fatores de aproximação entre setores que servem de base para orientar a alocação de estações de trabalho. Segundo TOMPKINS et Al (2003), estes procedimentos são:

- Definição do problema: definir ou redefinir o objetivo da instalação ou facilidade: quando planejar uma nova facilidade ou melhorar uma existente, é essencial que os produtos e/ou serviços futuros sejam devidamente quantificados, de forma que se defina volumes ou níveis de atividade.
- Análise do problema: determinar as inter-relações entre todas as atividades, estabelecendo de que maneira se deseja que estas interações ocorram.
- Determinação de necessidades de espaço por atividade: devem ser considerados todos os equipamentos, materiais e pessoas envolvidas no processo para cada atividade distinta.
- Avaliação de planos alternativos: diferentes layouts gerados devem ser comparados sob um critério de aceitação. Para SLACK et al (2002) o melhor layout é o que apresenta menor custo total de movimentação.
- Seleção do desenho preferencial: para MUTHER (1978), além de considerar o custo de movimentação, é preciso ponderar custos de implementação que devem ser comparados aos ganhos proporcionados pelo novo layout (custo-benefício) para cada layout alternativo.
- Implementação do novo layout: os processos do sistema devem ser testados em pré-operação e deve ser medida a sua eficácia em cumprir com os objetivos previstos para o sistema.

2.2 - Informações necessárias ao projeto de layout

Conforme MUTHER (1978), o ponto de partida para o início de um projeto de layout envolve cinco elementos: P (Produto), Q (Quantidade), R (Roteiro), S (Serviço de suporte), T (Tempo). As informações sobre produtos e/ou serviços que serão produzidos na planta determinam os materiais que serão processados, os tipos de equipamentos, máquinas e ferramentas que serão utilizadas nos processos. As informações sobre quantidades determinam a intensidade de fluxos de materiais. As informações de roteamento de processos determinam as sequências de operações em cada estação e indicam a direção dos fluxos de materiais na planta. Informações de serviços de suporte podem ser entendidas como meios de movimentação de materiais que serão utilizados, manutenções de equipamentos, pontos de inspeção de qualidade, etc. Informações de tempos de processo servem para dimensionar a quantidade de estações necessárias por processo que será executado.

Ainda segundo MUTHER (1978), a análise das informações sobre quais, quantos e como produtos serão processados no sistema de manufatura, fornece três parâmetros importantes que orientam o projeto de layout:

- Fluxos de materiais entre estações: quantidade de unidades movimentadas entre duas estações por período de tempo. Determinam uma escala de importância de proximidades entre alocações que é proporcional ao fluxo dos materiais.
- Razões de proximidade não baseadas em fluxo: quaisquer outros fatores que não de fluxo, mas que configuram motivos ou razões que influenciam a proximidade entre duas alocações. Estes outros fatores podem ser qualitativos, mas devem ser ponderados em escala numérica para que, juntamente com as informações sobre fluxo, forneçam uma escala de proximidades entre estações.
- Necessidades de espaço por estação de trabalho: são determinadas pelas dimensões das máquinas e suas partes móveis, pelos equipamentos utilizados em cada processo, pelos espaços ocupados por estoques intermediários, por espaços destinados à movimentação de operadores e de produtos, levando em conta também, acessos a pontos específicos de manutenção. Configuram um espaço ocupado e uma área mínima definida para cada estação na planta (Figura 1).

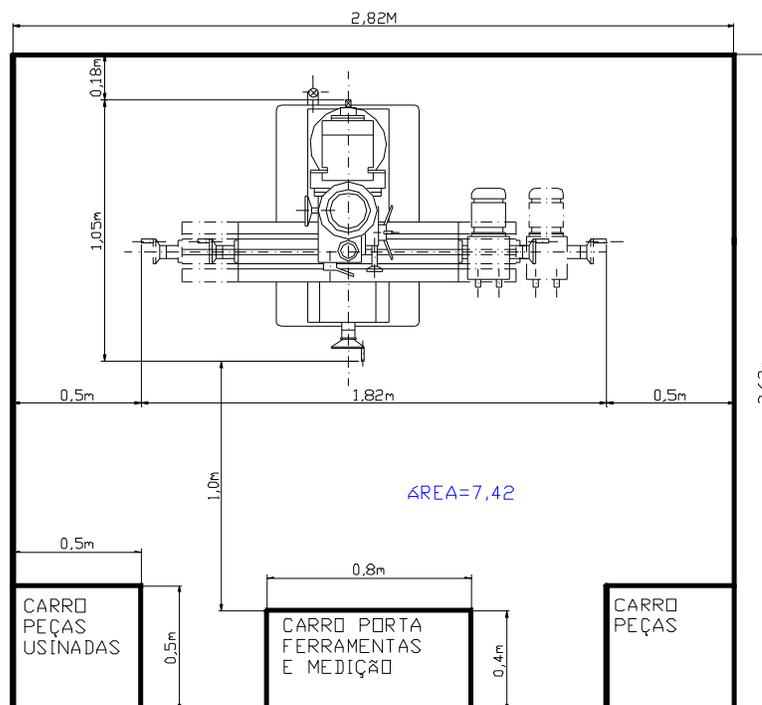


Figura 1 - Exemplo estação de trabalho

Fonte: Autor.

2.3 - Abordagem tradicional para projeto de layout

SLACK et al (2002), foca o projeto de layout no fluxo dos materiais entre processos, visando minimizar custos atribuídos à movimentação e às distâncias percorridas pelos produtos manufaturados. Os tempos de traslado e os recursos utilizados para este fim acabam por agregar custos ao produto. Arranjar os equipamentos ou estações de trabalho o mais próximo possível, encurta as distâncias percorridas pelos materiais e diminui a ocupação de recursos utilizados na movimentação (pessoas, carros, esteiras, empilhadeiras, pontes rolantes, etc.).

Assim, o processo de projeto de layout proposto por SLACK et al (2002), assemelha-se à abordagem de MUTHER (1978), exceto por não considerar relações entre atividades que não são baseadas em fluxo de materiais. O procedimento apresenta de cinco (5) passos, todos focados nos fluxos de materiais:

- Passo 1: coleta de informações sobre centros de trabalho e fluxos entre eles;

- Passo 2: desenho esquemático de arranjo físico mostrando a posição dos centros de trabalho e os fluxos entre eles colocando os pares de centros de trabalho com maior fluxo próximos entre si;
- Passo 3: ajuste do arranjo esquemático na área física disponível, considerando as restrições físicas;
- Passo 4: desenho do arranjo físico mostrando as áreas reais ocupadas pelos centros de trabalho e as distâncias percorridas por materiais e pessoas. Cálculo da eficácia do arranjo levando em conta as distâncias percorridas e os custos de movimentação;
- Passo 5: checagem das possibilidades de troca da localização de quaisquer centros objetivando reduzir a distância total percorrida e/ou o custo total de movimentação. Se acontecer redução, retorna-se ao passo 4. Se não, este é o arranjo final.

Para SLACK et al (2002), a eficácia de arranjos por processo pode ser calculada da seguinte forma:

$$\text{Eficácia do arranjo} = \sum F_{i,j} D_{i,j} C_{i,j} \text{ para todo } i \neq j \text{ onde:} \quad \dots(1)$$

$F_{i,j}$ = fluxo em carregamentos ou ocorrências por período, do centro de trabalho i para o centro j .

$D_{i,j}$ = distância entre os centros i e j .

$C_{i,j}$ = custo por unidade de distância percorrida para traslado entre centros de trabalho i e j .

Há que se considerar que nem sempre os custos de movimentação de materiais entre estações são idênticos. Neste entendimento, pode-se considerar um produto manufaturado que requer meios especiais de traslado entre os diferentes processos na satisfação de exigências distintas e adicionais a cada etapa. Eventualmente, se o custo de traslado for o mesmo entre quaisquer centros de trabalho, não há necessidade de considerá-lo no cálculo.

2.4 - Sistema SLP de Muther

MUTHER (1978) desenvolveu um procedimento para projeto de arranjo físico denominado “*sistema SLP (Systematic Layout Planning)*”, ou planejamento sistemático do layout, que consiste de uma sequência de etapas que o projeto de layout deve contemplar. Trata-se de um roteiro de processos passo a passo de atividades para realização do projeto (Figura 2).

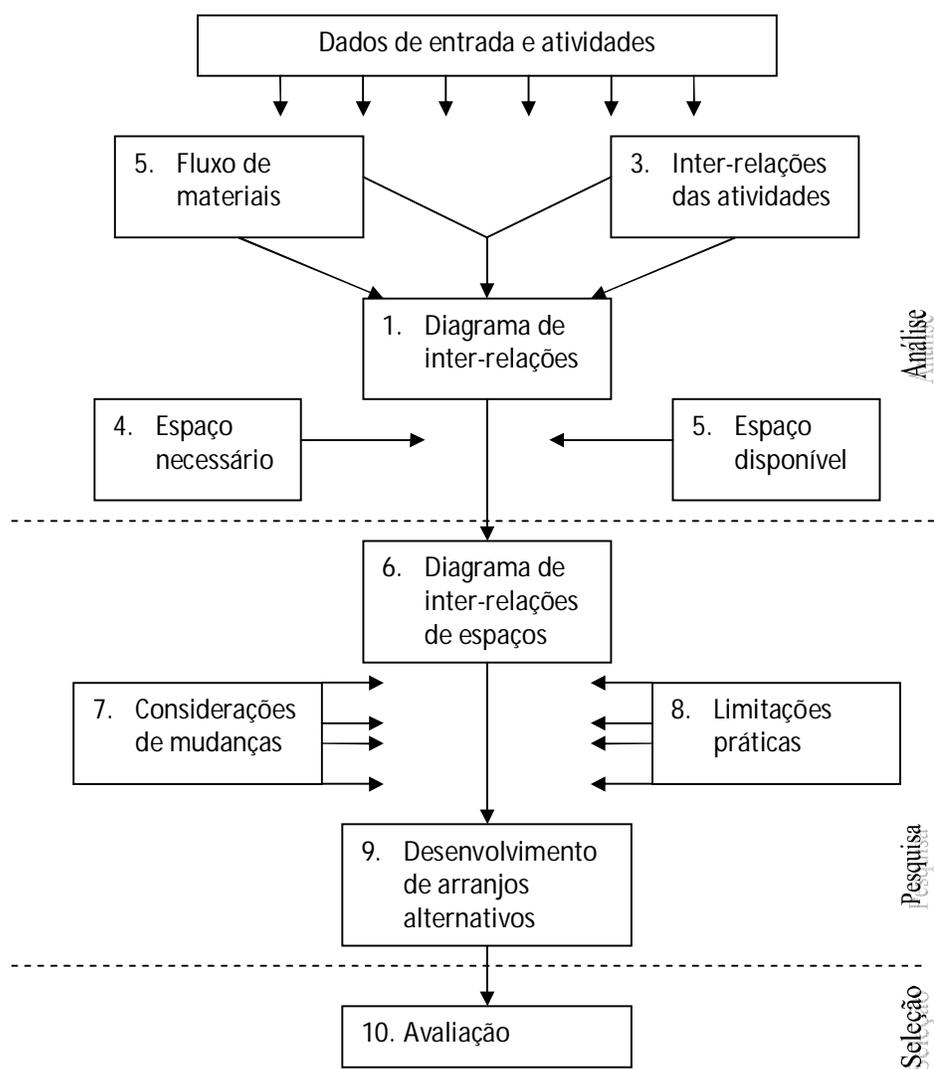


Figura 2 - Sistema de procedimentos SLP;

Fonte: TOMPKINS, 2003.

O diferencial do sistema SLP, no desenvolvimento do layout, reside na ponderação de relações qualitativas entre atividades não baseadas no fluxo de materiais, conjuntamente às

mensurações de fluxo. MUTHER (1978) considera que o fluxo de materiais isoladamente não é a melhor base para o planejamento de instalações, porém é determinante quando da escolha entre arranjos alternativos.

Baseado nos diversos dados e sequências de processo coletados, e no entendimento de como estas ocorrências interferem nos inter-relacionamentos entre atividades, são efetuadas análises dos fluxos utilizando-se de carta de processos múltiplos, e carta de/para. Baseado nos dados qualitativos que não se referem ao fluxo, bem como na compreensão de como estas informações interferem nos inter-relacionamentos entre as atividades, são elaboradas análises utilizando-se carta de inter-relacionamentos não baseados em fluxo (Figura 3).

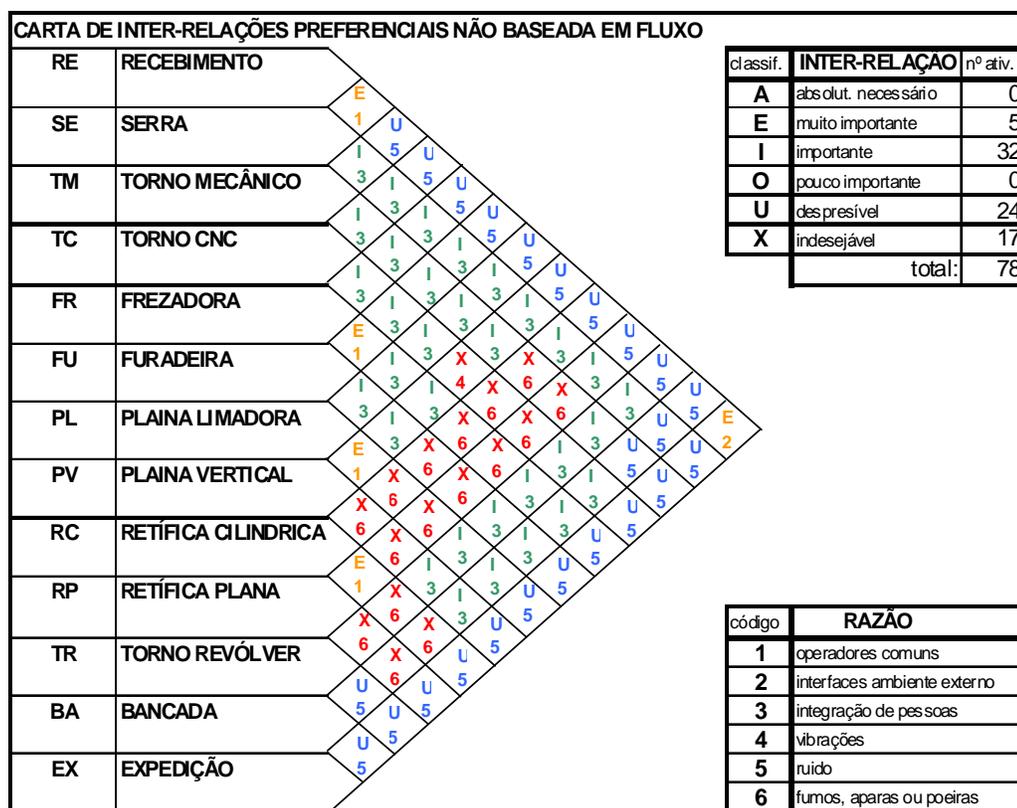


Figura 3 - Exemplo de carta de inter-relações não baseado em fluxo.

Fonte: Autor.

Após a análise de todas estas inter-relações, elabora-se uma nova carta onde se estabelecem inter-relações ponderadas através da atribuição de fatores numéricos de peso entre as baseadas em fluxo e as não baseadas em fluxo.

O resultado destes procedimentos é indicado em uma escala de proximidades entre as estações. Estas inter-relações obedecem a uma escala alfabética, “A, E, I, O, U, X” que

representam graus de proximidade, onde: A = absolutamente necessária; E = muito importante; I = importante; O = pouco importante; U = desprezível; X = indesejável. Estas diferentes inter-relações podem ser entendidas como medidas de atração entre os locais de uma planta, e também de repulsão representada pela letra “X” (Figura 4). Esta notação é utilizada por diversos autores e em diferentes procedimentos em estudos de layout.

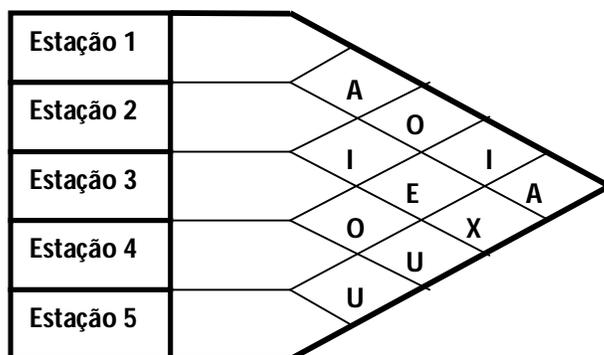


Figura 4 - Carta de inter-relações

Fonte: MUTHER, 1978.

O passo seguinte é dispor as estações no plano considerando as proximidades indicadas por diferentes linhas de ligação, arranjando-as entre si de forma a aproximar os pontos de maior importância. Este procedimento permite gerar diferentes arranjos de blocos que devem ser avaliados para a escolha de um que será implantado.

2.5 - Modelamento em projeto de layout

Há três tipos de ferramentas de modelagem para problemas de layout, sendo: programação matemática, sistemas de filas e modelos de simulação. Segundo HERAGU (2006), quando usadas nesta ordem propiciam aos tomadores de decisão incorporar vários níveis de informação e chegar a razoavelmente boas soluções para os problemas de layout.

Programação matemática consiste de uma ferramenta estática no sentido de que trabalha com dados determinísticos. Para HERAGU (2006), ela não captura aspectos dinâmicos dos sistemas de layout, como por exemplo, a interferência homem-máquina, que pode ser considerada em modelos de filas. Enquanto a programação linear é uma ferramenta

de otimização, modelos de fila e simulação são ferramentas de avaliação do desempenho de sistemas.

Os valores ótimos das variáveis de decisão gerados pelo modelo matemático podem ser tratados como soluções preliminares a ser refinadas em estágios posteriores por sistemas de filas e modelos de simulação. Por exemplo, em uma decisão de quantidade e tipo de um equipamento de manufatura pode-se usar modelos matemáticos para uma determinação preliminar da necessidade. Usando modelos de fila e simulação pode-se melhorar esta decisão preliminar através da geração de informações sobre medições-chave de desempenho para o desenho inicial, e, com a análise destas medições é possível sugerir mudanças no desenho inicial que melhorem os resultados de desempenho.

Ainda segundo HERAGU (2006), na prática a modelagem é ignorada. Companhias não possuem habilidade em modelagem de problemas de instalações, e altos gestores não têm ciência das enormes economias de custos que poderiam ser obtidas através do desenvolvimento de “quase ótimos” desenhos de instalações. A gestão de várias companhias resume-se a “apagar incêndios”, em que predomina o pensamento de que não há tempo para modelar o desenho e planejamento de instalações matematicamente.

2.6 - Outras abordagens para o problema de layout

Os diversos estudos publicados sobre o problema de layout têm apontado diferentes tendências e direcionamentos de pesquisa. Segundo DRIRA et Al (2007), ou estes estudos não são muito recentes, ou focam aspectos específicos do desenho de layout.

A Pesquisa Operacional, desenvolvida durante a Segunda Guerra Mundial, levou ao desenvolvimento de modelos analíticos para planejamento e desenho de instalações. KOOPMANS e BECKMAN (1957) apud HERAGU (2006) introduziram o problema quadrático de designação (*QAP*) para modelar problemas de localização macro, por exemplo, localização de fábricas e centros de distribuição em grande área geográfica, bem como para modelar problemas de localização micro, como por exemplo, layouts de departamentos em uma fábrica.

Desde então, significativos esforços tem sido empregados para solução destes modelos e em desenvolvimento de softwares para o problema de layout de fábrica. A técnica Planejamento Sistemático de Layout (*Systematic Layout Planning* ou *SLP*), introduzida no

fim dos anos 1950, é o método utilizado por consultores até os dias de hoje. Alguns pacotes de software são modelados sobre a técnica *SLP*, como por exemplo, *FactoryCAD*, *FactoryPLAN*, *FactoryFLOW*, *Layout-iQ*. Os procedimentos *SLP* de MUTHER (1978) continuam sendo básicos para elaboração de diversos modelos e algoritmos para o problema de layout.

Para HERAGU (2006), dada a dificuldade de se obter soluções ótimas para estes modelos por serem NP completos (GAREY e JOHNSON (1979)), diversos algoritmos e técnicas heurísticas têm sido desenvolvidos para busca e aprimoramento de soluções alternativas para o problema de layout, tais como, pesquisa tabu, *simulate annealing*, algoritmo genético, entre outros.

Outros estudos têm apontado técnicas utilizando a Lógica *Fuzzy* como instrumento de auxílio à decisão em problemas de layout, por ser capaz de ponderar a influência de diversas variáveis nas inter relações entre estações de trabalho através da inferência de regras lingüísticas que imitam decisões de especialistas. DWEIRI (1999) criou um modelo para a elaboração de uma carta de inter relações com valores quantitativos gerados através de processamento *Fuzzy*. DEB e BHATTACHARYYA (2005) elaboraram um modelo de *Fuzzy* para escolha entre diversos pontos pré-fixados de carga e descarga nas estações de trabalho com o objetivo de minimizar custo de movimentação, espaços mortos e área total ocupada pelo layout.

2.7 - Resumo e discussão das abordagens

Para expor com maior clareza uma parte da diversidade de abordagens que pesquisadores têm proposto para a solução de problemas de layout, elaborou-se uma série de quadros sinópticos contendo os conceitos empregados, os objetivos de cada técnica, suas funcionalidades e suas limitações (Quadros 1 a 7).

ABORDAGENS TRADICIONAIS		
Método	Objetivo	Conceito básico
Mensuração de fluxos (carta de-para)	Localizar espaços em uma planta aproximando locais de maiores fluxos / custos por distâncias percorridas.	$Min \sum F_{ij} D_{ij} C_{ij}$ Minimizar fluxo x distância x custo.
	Funcionalidade	Limitações
SLACK et al (2002)	Resulta em um escala de proximidades entre espaços que orienta o posicionamento destes na planta.	Não gera um layout ótimo e sim diversos alternativos por sucessivas tentativas que precisam ser avaliados para uma escolha.
Método	Objetivo	Conceito básico
Sistema SLP	Obter uma escala de importância de proximidades poderando fatores quantitativos e qualitativos que influenciam a disposição entre espaços.	Incorpora o conceito acima, mas também pondera outras razões diversas de proximidade que influenciam o arranjo.
	Funcionalidade	Limitações
MUTHER (1978)	Resulta em um escala qualitativa (A,E,I,O,U,X) de proximidades entre espaços que orienta o posicionamento destes na planta.	Não gera um layout ótimo e sim diversos alternativos por sucessivas tentativas que precisam ser avaliados para uma escolha.

Quadro 1 - Abordagens tradicionais

Fonte: SLACK et al, 2002; MUTHER, 1978.

A maioria das abordagens expostas neste estudo trata o problema de layout como uma complexa análise combinatorial entre diversas soluções possíveis, e, muitos estudos resumem-se a elaborar heurísticas capazes de fornecer alguma solução que seja gerada por processamento computacional. Algumas técnicas são capazes de gerar apenas um layout inicial que deve ser aprimorado com a utilização de heurísticas. Estas por sua vez dependem de uma solução inicial boa para que possam gerar layouts alternativos de qualidade através de sucessivas comparações combinatoriais, avaliando cada solução possível através do resultado da função objetivo.

Em comum, pode-se observar que todas as técnicas consideram a movimentação de materiais e/ou pessoas entre locais como fator determinante para elaboração do layout. Busca-se arranjar alocações de forma a minimizar as distâncias percorridas na planta e os custos relativos a estes deslocamentos. Isto é feito aproximando-se locais de maiores fluxos entre si e alocando em redor destes os demais locais com menor movimentação, de forma a minimizar a somatória de todos os produtos dos Fluxos x Distâncias x Custos de movimentação que ocorrem na planta.

MODELOS MATEMÁTICOS		
Método	Objetivo	Conceito básico
Problema de sequência única unidirecional	Localizar espaços alinhando-os em uma planta de maneira a aproximar locais de maiores fluxos / custos por distâncias percorridas minimizando o custo total de movimentação.	$\text{Min} \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n C_{ij} f_{ij} x_i - x_j $ Minimizar custo x fluxo x distância.
	Funcionalidade	Limitações
	O modelo retorna as distâncias (x) entre os centroides de cada estação a uma linha de referência vertical.	Os fluxos devem seguir uma mesma direção e em fila. Havendo sequência pré-definida de operações em cada estação esta é que definirá o arranjo.
Método	Objetivo	Conceito básico
Problemas multi-fluxos com áreas iguais	Localizar espaços que ocupam áreas idênticas considerando dois eixos (x,y), de maneira a minimizar o custo total do número de viagens requerido entre os departamentos.	$\text{Min} \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n C_{ij} f_{ij} (x_i - x_j + y_i - y_j)$ Minimizar custo x fluxo x distância.
	Funcionalidade	Limitações
	O modelo retorna as distâncias (x,y) entre os centroides de cada estação às linhas horizontal e vertical de referência no plano.	Requer áreas pré-definidas e iguais. As distâncias referem-se aos centroides das áreas, desconsiderando as fronteiras de entrada e saída de cada estação.
Método	Objetivo	Conceito básico
Problemas multi-fluxos com áreas desiguais	Localizar espaços que ocupam áreas desiguais considerando dois eixos (x,y), de maneira a minimizar o custo total do número de viagens requerido entre os departamentos.	Mesmo modelo anterior, porém restrições adicionais consideram as dimensões prévias das áreas retangulares.
	Funcionalidade	Limitações
	A mesma anterior, com maior acuracidade por considerar a forma retangular de diferentes áreas alocadas no plano (x,y).	Requer áreas pré-definidas quadradas ou retangulares e sua orientação prévia no plano. Requer grande capacidade computacional para solução.
Método	Objetivo	Conceito básico
Problemas de loop layout (LLP)	Localizar máquinas ou estações ao longo de um loop onde o trajeto dos materiais inicia e termina no mesmo ponto, de maneira a minimizar os custos de movimentação.	$\text{Min} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n C_{ij} f_{ij} h_{ij}$ Minimizar custo x fluxo x distância.
	Funcionalidade	Limitações
	O modelo retorna uma sequência de estações atendidas por sistemas mecanizados de movimentação com o menor custo de traslado.	Cada sistema de manufatura é único em termos de tecnologias utilizadas e dos particulares produtos. Contextos diferentes requerem modelagem distinta.
Método	Objetivo	Conceito básico
Modelo em P.L. para layout de blocos	Elaborar arranjo mais detalhado pela identificação de adjacências entre máquinas, especificando pontos de entrada e de saída para cada departamento.	$\text{Min} \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n C_{ij} f_{ij} (x_{ij}^+ + x_{ij}^- + y_{ij}^+ + y_{ij}^-)$ Minimizar custo x fluxo x distância.
	Funcionalidade	Limitações
	O modelo retorna um arranjo de blocos que minimiza o custo total de movimentação de materiais entre departamentos.	Requer conhecimento prévio das posições relativas dos departamentos e de suas adjacências, dados que fazem parte das restrições do modelo.

Quadro 2- Modelos matemáticos

Fonte: HERAGU, 2006.

É necessário o conhecimento exato de todas as movimentações, das sequências de processos que cada produto sofrerá, dos meios de movimentação empregados e dos custos de traslado por unidade de distância. O levantamento destas informações se torna cada vez mais complexo quanto maior a diversidade de produtos que sofrem diferentes sequências de processos, típicos da manufatura em *jobshop* que é o foco deste estudo.

ALGORITMOS		
Método	Objetivo	Conceito básico
Árvore abrangente modificada (MST)	Fornecer uma sequência de estações em linha estabelecendo e permutando pares adjacentes de maneira a minimizar custo de traslado pela distância percorrida entre estações.	$\text{Min} \sum F_{ij} D_{ij} C_{ij}$ Minimizar fluxo x distância x custo.
	Funcionalidade Algoritmo de construção. O algoritmo fornece um layout em linha de fluxo unidirecional.	Limitações Solução grafica. Não considera fluxos entre estações não adjacentes. Não se aplica onde há uma sequência pré-definida de processos
Método	Objetivo	Conceito básico
Algoritmos "2-Opt" e "3-Opt"	Aprimorar soluções iniciais ou layouts existentes. O modelo matemático é o mesmo dos problemas multi-fluxos de áreas iguais e serve para comparar as soluções geradas.	$\text{Min} \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n C_{ij} f_{ij} \left(x_i - x_j + y_i - y_j \right)$ Minimizar custo x fluxo x distância.
	Funcionalidade Permuta pares de departamentos. Se a solução é melhor que a inicial, fixa estes locais e passa a permutar outros. "3-Opt" processa trios.	Limitações O resultado é uma solução melhorada. Esta solução deve alimentar o algoritmo sucessivas vezes até que a solução se repita sem modificações.
Método	Objetivo	Conceito básico
Algoritmo de penalidades modificado (MP)	Aprimorar soluções iniciais ou layouts existentes. Envolve a transformação do modelo anterior restrito em aberto, introduzindo as restrições na função objetivo através de parâmetros de penalidade.	$\text{Min} \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n C_{ij} f_{ij} \left(x_i - x_j + y_i - y_j \right)$ Minimizar custo x fluxo x distância.
	Funcionalidade Gera diferentes equações solução resolvidas sucessivamente por algoritmo de Powell. Ao se obter uma solução possível, aprimora-se esta usando algoritmo "2-Opt".	Limitações Algoritmo híbrido. Necessita de processamento computacional. Sucessivas realimentações geram uma solução possível que precisa ser aprimorada com o algoritmo "2-Opt".

Quadro 3 - Algoritmos

Fonte: HERAGU, 2006.

As técnicas elaboradas por diversos autores apresentados neste estudo sugerem que o layout ótimo é aquele que possibilita obter o menor custo possível de movimentação de materiais, mas, estando esta condição satisfeita, a planta seria capaz de permitir eficiência máxima das operações?

MUTHER (1978) argumenta que arranjos alternativos devem ser avaliados considerando a eficiência da operação a que a planta se destina. Então as abordagens baseadas unicamente na minimização de custos de movimentação são aplicações específicas e não deveriam ser aplicadas a todos os tipos de problemas de layout. Os modelos seriam adequados, por exemplo, a armazéns ou centros de distribuição, tanto para sua localização geográfica, quanto para a minimização dos custos de movimentação, já que os produtos não sofrem processos, sendo apenas estocados e retirados para distribuição.

Mesmo neste caso, seria necessário estudar as diferentes estratégias de *picking*, que não necessariamente corresponderiam ao menor custo de traslado, mas talvez ao menor tempo de atendimento. Ainda neste caso, as informações sobre estoques de produtos, e o correto dimensionamento destes, são indispensáveis para o projeto do layout.

SOFTWARES		
Método	Objetivo	Conceito básico
CORELAP	Fornece um layout considerando uma escala de importância de adjacências (A,E,I,O,U,X) entre estações (carta de inter-relações), obtidos pelo procedimento SLP de Muther	As saídas do sistema SLP de Muther são os dados de entrada do software, portanto, consiste de uma heurística computacional de aprimoramento.
	Funcionalidade Fixa a estação de maior índice de proximidade. Aloca as demais uma a uma em ordem decrescente de interações com as já fixadas.	Limitações Requer aplicação do sistema SLP. O software atribui valores numéricos às inter-relações. A mudança destes valores pode gerar layouts distintos.
Método	Objetivo	Conceito básico
CRAFT	Aprimorar layouts iniciais obtidos por outras técnicas, ou um existente, gerando diversos alternativos.	Utiliza o algoritmo "2-Opt" (e o mesmo modelo matemático) como estratégia de desenvolvimento.
	Funcionalidade Permuta pares de departamentos. Se a solução é melhor que a inicial, fixa estes locais e passa a permutar outros.	Limitações Não executa todas as permutas possíveis, limitando-se às de maior redução de custos. Depende de uma boa solução inicial para um bom resultado.
Método	Objetivo	Conceito básico
BLOCPAN	Converte dados de entrada quantitativos e/ou qualitativos em uma carta de inter-relações cuja escala (A,E,I,O,U) serve de parâmetro para a alocação de áreas.	$\sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n d_{ij} R_{ij}$ Permutas de locais formam um placar do produto distância x inter-relação.
	Funcionalidade Pode resolver um layout usando 3 algoritmos, um de construção randômico, um de aprimoramento, ou um de investigação automático.	Limitações Processa até 18 departamentos. Aprimora layouts reprocessando as soluções em até 20 ciclos. Falta de precisão na consideração de fluxos.
Método	Objetivo	Conceito básico
PFAST	Fornece estatísticas descritivas para dados de roteamento de diferentes peças, identificar agrupamentos de sequências de máquinas e/ou de peças, considerando suas comunalidades.	Modelo heurístico baseado na técnica de análise de <i>clusters</i> da estatística descritiva, trabalha com as variáveis Produto, Quantidade e Receita.
	Funcionalidade Fornece o dendograma de agrupamentos que identifica os diversos grupos de máquinas ou de peças processadas em cada grupo.	Limitações Não fornece layouts acabados, mas sim informações de agrupamentos de peças e/ou máquinas indicando por exemplo possíveis células de manufatura.
Método	Objetivo	Conceito básico
VIP_PLANOPT	Gerar layouts quase ótimos por utilizar vários sofisticados algoritmos. Fabricantes alegam que a ferramenta é capaz de resolver problemas com mais de 500 departamentos.	Algoritmo de aprimoramento baseado na técnica <i>SimulateAnnealing</i> que é uma heurística genérica que incorpora probabilidades e aproximações.
	Funcionalidade Trata-se de um pacote de software comercial, que fornece interface gráfica amigável de alta qualidade e gera layouts quase ótimos.	Limitações Problemas de layout são NP completos, e, por definição não existe técnica que garanta ótimas soluções para problemas médios ou grandes.

Quadro 4 - Softwares

Fonte: HERAGU, 2006.

Considerando os objetivos da planta, por exemplo, não faria sentido minimizar o traslado de pessoas em um super mercado. Neste caso o layout procura facilitar a movimentação dos carros de compra em corredores entre as gôndolas, porém a disposição dos produtos nestas gôndolas é feita de forma que o cliente percorra toda, ou grande parte da loja, até acessar os produtos de maior consumo. Neste trajeto são expostos produtos de menor consumo ao cliente como forma de incentivar a compra destes.

SOFTWARES MODULARES		
Método	Objetivo	Conceito básico
FactoryCAD	Customizar o AutoCad agilizando o desenho de layout ou a edição de existentes.	Facilitar o desenho de arranjo físico em AutoCad.
	Funcionalidade Auxiliar o desenho físico de instalações.	Limitações Requer software AutoCad. Não gera layout.
FactoryPLAN	Fornece uma interface gráfica para a alocação de espaços pela visualização de inter-relações qualitativas representadas por diferentes linhas.	Abordagem complementar ao sistema SLP de Muther para obtenção de layouts alternativos.
	Funcionalidade Direcionar o usuário nas sucessivas tentativas de alocação de espaços através de placares comparativos.	Limitações Requer procedimento SLP. Requer software AutoCad. Fornece um layout por sucessivas tentativas e erros.
FactoryFLOW	Calcula custos de movimentação relativos a diferentes arranjos. Constitui um meio para avaliação de layouts alternativos.	Escolha entre diferentes sistemas de movimentação de materiais e adequação do layout.
	Funcionalidade Fornece visualização e análise dos fluxos entre estações, dos meios utilizados e unitizações.	Limitações Requer software AutoCad. Não gera layout. Melhorias obtidas por sucessivas tentativas e erros.
Layout-iQ	Minimizar distâncias percorridas estabelecendo um placar (<i>score</i>) através de sucessivas mudanças de posição de espaços na planta.	Calcula e exibe graficamente altas intensidades de tráfego por linhas grossas e baixas por linhas finas.
	Funcionalidade Direcionar o usuário nas sucessivas tentativas de alocação de espaços através de placares comparativos.	Limitações Requer software AutoCad. Não gera layout. Melhorias obtidas por sucessivas tentativas e erros.

Quadro 5 - Softwares modulares

Fonte: HERAGU, 2006.

Em manufatura o projeto de layout é ainda mais complexo. Se considerarmos uma linha de montagem em cujos processos sofrem sequências bem definidas e com tempos balanceados, o layout se resumiria a alocar os diferentes equipamentos no entorno de uma linha em que o produto principal se desloca e recebe os diversos componentes. Neste caso não há preocupação com estoques que praticamente inexistem.

Em uma operação tipo *jobshop* podem ocorrer diversas sequências diferentes, fluxos contrários e cruzados, e, principalmente, diferentes tempos de processamento em cada estação para cada produto, além de que, estes tempos podem sofrer variações segundo alguma dispersão estatística. Um conjunto de operações cujos tempos não são balanceados pode provocar bloqueios se não forem utilizados estoques intermediários, e estes por sua vez ocupam espaços na planta.

HEURÍSTICAS AVANÇADAS		
Método	Objetivo	Conceito básico
Simulate annealing	Aprimorar uma solução inicial obtida por alguma técnica, ou um layout existente. Originalmente foi concebido como um algoritmo para solução de problemas combinatoriais complexos, o que também é o caso dos problemas de layout.	Técnica estatística de aproximações criada por analogia ao processo de recozimento de aços, onde, a partir do ponto de fusão, o lento e gradual resfriamento, gera cristais fisicamente mais organizados e menos energéticos do que com o resfriamento brusco. Decréscimos de temperatura equivalem a reduções graduais nos resultados da função objetivo quando esta é minimizante. Ciclicamente é feita nova pesquisa considerando o novo resultado como a solução inicial.
	Funcionalidade Os algoritmos 2-Opt, 3-Opt e CRAFT fixam alocações iniciais ótimas e posteriormente aloca as demais áreas fixando-as quando há decréscimo nos custos. O resfriamento simulado não "congela" uma região ótima qualquer, pesquisa também suas vizinhanças buscando soluções melhores antes de resfriá-las, varrendo de forma mais flexível e abrangente as soluções alternativas.	Limitações Grandes decréscimos de temperatura podem abreviar o tempo de processamento e fornecer uma solução rápida, porém de qualidade inferior. Por outro lado, pequenos decréscimos geram soluções muito melhores, mas que consomem muito em processamento de dados computacional pelo fato de incrementar demasiadamente os ciclos de pesquisa realizados a cada nova solução admitida, relativamente próxima da anterior.
Tabu search	Aprimorar uma solução inicial obtida por alguma técnica, ou um layout existente, podendo sobrepor outras técnicas de refinamento de soluções combinatoriais. Analogamente ao Simulate Annealing, também possui mecanismos que não prendem a pesquisa a alguma região inicial ótima.	O algoritmo testa sucessivas alternativas, armazenando a lista dos diferentes resultados da função objetivo em uma memória de curto prazo (lista Tabu). Ao realizar novas permutações na pesquisa, compara os resultados aos da lista Tabu. Se melhores que os da lista são considerados e inclusive tornando-se tabu, se não, descartados.
	Funcionalidade O algoritmo guia a pesquisa e a torna eficiente por manter rastros de soluções exploradas recentemente, e determinando se uma solução recente pode ser admitida. Este processo segue indefinidamente até que um ou vários critérios de término sejam satisfeitos..	Limitações Não acumula memória, pode repetir sucessivas buscas e exames de soluções previamente explorados desperdiçando tempo computacional. Parâmetros para o tamanho da lista Tabu (t), e do máximo número de interações (ν), podem ser introduzidos como critério de término da pesquisa. Economizam tempo de processamento mas diminuem a qualidade do resultado.
Algoritmo genético	Buscar soluções quase ótimas para problemas combinatoriais complexos, inclusive o de layout. Inspirado em sistemas biológicos que geram indivíduos adaptados ao meio ambiente.	Incorpora o conceito de evolução, onde os indivíduos descendentes de sobreviventes saudáveis estarão mais aptos a adaptarem-se ao meio ambiente de forma bem sucedida e prosperar. Uma população inicial é gerada por combinações randômicas, e as de melhores aptidões (soluções) são selecionadas para produzir novas gerações.
	Funcionalidade O algoritmo representa layouts em séries numéricas (cromossomo), e gera indivíduos de uma população alternando a posições dos (genes) componentes da série. As aptidões são comparadas analisando-se os resultados da função objetivo para cada indivíduo. Os melhores são selecionados para gerar novas populações, em sucessivas aprimorações.	Limitações Requer extenso processamento computacional. A solução retomada pelo algoritmo pode ser aquela que não apresente melhoria significativa de aptidão do indivíduo por várias gerações, ou simplesmente o indivíduo mais apto obtido ao longo de um número pré determinado de gerações introduzido pelo usuário.
Grafos teóricos	Gerar um posicionamento gráfico de áreas alocadas em planta considerando apenas quais destas devem ser adjacentes. A partir destas adjacências o desenista pode elaborar um layout inicial.	Baseado no conceito de grafos planares. Um conjunto finito de nós (estações) ligados por arcos (adjacências) representado no plano onde não ocorra cruzamentos entre os arcos.
	Funcionalidade Cada área é alocada ao redor de cada nó de forma que as fronteiras cortem todos os arcos ligados a este nó, garantindo desta forma as adjacências entre outras áreas do grafo.	Limitações Não considera inter-relações entre áreas que não são fronteiriças. Limitado a pequenos problemas. Gera apenas um layout inicial que precisa ser aprimorado por outras técnicas.

Quadro 6 - Heurísticas avançadas

Fonte: HERAGU, 2006.

Portanto, a minimização de custos de traslado pura e simples, pode não ser suficiente para a elaboração de um bom layout em *jobshop*. Pode ser considerada como um parâmetro para geração de um layout inicial. A necessidade de estoques intermediários, o dimensionamento destes estoques e sua posição na planta influem no projeto do layout porque ocupam espaços, bem como interferem na eficiência das operações. Estimar estes parâmetros é tarefa complexa por envolver comportamentos estatísticos de várias filas entre processos.

LÓGICA FUZZY		
Método	Objetivo	Conceito básico
Modelo fuzzy para carta de inter-relações	Obter uma escala de importância de inter-relações entre estações ponderando diversas variáveis (qualitativas e quantitativas) que influenciam o arranjo físico.	Gerar um modelo que considera diversas variáveis e de como estas interagem entre si, através de regras que imitam decisões de especialistas.
	Funcionalidade	Limitações
DWEIRI (1999)	Compor uma carta de inter-relações entre atividades com valores determinísticos para auxílio ao desenho do layout.	Não gera um layout ótimo e sim diversos alternativos por sucessivas tentativas que precisam ser avaliados para uma escolha.
Método	Objetivo	Conceito básico
Sistema fuzzy de apoio à decisão em layout	Pesquisar entre pontos de carga e descarga candidatos em cada estação com o objetivo de minimizar o custo de fluxo e reduzir áreas mortas.	Gerar um modelo que considera diversas variáveis e de como estas interagem entre si, através de regras que imitam decisões de especialistas.
	Funcionalidade	Limitações
DEB e BHATTACHARYYA (2005)	Gerar um placar comparativo capaz de indicar quais pontos alternativos de carga e descarga geram o menor custo quando adotados no layout.	Modelo concebido para uma aplicação específica para melhoria de uma planta existente.

Quadro 7 - Lógica Fuzzy

Fonte: DWEIRI, 1999; DEB e BHATTACHARYYA, 2005.

Estas características das operações em *jobshop* justificam a utilização de simulação computacional como abordagem complementar para o projeto de layout. Os simuladores incorporam e emulam variações estatísticas de tempos de processo, bem como fornecem indicações para a necessidade de estoques intermediários e parâmetros para o dimensionamento destes. HERAGU (2006) afirma que os valores ótimos das variáveis de decisão gerados pelo modelo matemático podem ser tratados como soluções preliminares a ser refinadas em estágios posteriores por sistemas de filas e modelos de simulação. A simulação de toda a operação em diferentes cenários produz indicadores de desempenho que servem como parâmetros para aprimoramento do modelo, ou para criação de novos modelos.

3. - SISTEMAS DE MANUFATURA E PRODUTIVIDADE

3.1 - Operações

Uma organização de negócios pode abranger um leque de funções, segundo SLACK et al. (2002). As funções centrais são as que se relacionam diretamente com a atividade objeto do negócio. Estas são: marketing, desenvolvimento de produto/serviço e a produção. Já as funções de apoio são as que suprem e suportam a função produção, tais como as funções: contábil-financeira, de recursos humanos, engenharia e suporte, informação e tecnologia, etc.

Cada atividade exercida na empresa constitui uma operação, seja em vendas e prospecção de mercado, em desenvolvimento de produtos, em pesquisa e geração de conhecimentos, em recursos humanos, em recursos e tecnologias de processo, em movimentação, armazenagem e distribuição de materiais e produtos, nos processos de transformação, em contabilidade e finanças, em tecnologia de informação, etc.

Portanto, a gestão da produção na atualidade não pode apresentar um contexto isolado das demais atividades. Para SLACK e LEWIS, (2003), todas as operações de qualquer empreendimento são estratégicas e devem estar alinhadas e conciliadas com os objetivos de performance que são formados pelo entendimento do ambiente competitivo, dos desejos dos clientes e do posicionamento desejado no mercado. Sob o mesmo raciocínio, o pleno conhecimento e utilização de processos bem desenvolvidos em operações, pela utilização de tecnologias de ponta, ou pelo acúmulo de conhecimentos explícitos ou tácitos, também pode permitir que o empreendimento devidamente capacitado avance na conquista de novas posições competitivas no mercado e também de novos consumidores.

Ainda segundo SLACK e LEWIS (2003), operações são formadas pelo conjunto de recursos e de processos. Estes, somados ao conhecimento acumulado sobre estas operações e suas capacidades são a base para tomada de decisões estratégicas, em termos de capacidade, redes de fornecedores, tecnologia de processo, desenvolvimento e organização das operações.

As capacidades das operações, ainda segundo SLACK e LEWIS (2003), devem ser conhecidas e entendidas para que estas configurem o nível de desempenho que a operação é capaz de atingir, e com o conhecimento deste, é possível posicionar estrategicamente o empreendimento no mercado em relação a concorrentes e a consumidores.

Para MARTINS e LAUGENI (2001), um processo é capaz quando consegue produzir continuamente dentro de limites máximos e mínimos de tolerância especificados, que atendam as exigências do consumidor.

Sob o contexto de estratégia de operações, justifica-se a preocupação dos autores com as abordagens dinâmicas e estratégicas atribuídas ao *plant layout* na atualidade. O layout passa a exercer função estratégica na gestão da produção ou de operações, porque estas precisam ser otimizadas constantemente e devem ser flexíveis ao ponto de responder rápida e eficientemente aos movimentos do mercado, segundo TOMPKINS et al. (2003), HERAGU (2006), e vários outros autores.

3.2 - Processo de transformação

Para SLACK et al. (2002), todas as operações que produzem bens e/ou serviços englobam procedimentos ou processos de transformação que envolvem o uso de recursos para mudar o estado físico ou a condição de algo que ao sair do sistema é o *output*. A produção se utiliza de um conjunto de recursos de *input* usado para transformar ou ser transformado em *outputs* de bens e/ou serviços. Portanto, qualquer operação pode ser resumida em um modelo *input-transformação-output*.

Ainda para SLACK et al. (2002), bem como para MARTINS e LAUGENI (2001), os *inputs* podem ser entendidos como recursos transformados e recursos de transformação que agem sobre os primeiros.

Os recursos transformados podem ser materiais, informações e consumidores. Os recursos de transformação podem ser divididos em *staff* e instalações (*facilities*). O *staff* engloba todas as pessoas envolvidas nas operações direta e indiretamente, ou seja, operadores, manutentores, planejadores, gestores, etc. As *facilities* incluem prédios, equipamentos, mecanismos, além da disposição de todas as facilidades necessárias à operação segura destes.

O processamento pode ser de materiais; matérias primas são transformadas em produtos; de informações, estas podem ser estocadas, transformadas em outras diferentes ou até transferidas de um local a outro, como por exemplo, telecomunicações; e também de consumidores, que podem ser transportados (ônibus, trens, aviões), podem ser estocados (em hotéis, por exemplo), e podem sofrer transformações fisiológicas e também psicológicas

(medicina). Analogamente, os *outputs* podem ser produtos manufaturados, podem ser serviços diversos de informação e também serviços relacionados a pessoas.

3.3 - Sistemas de manufatura

Uma organização ou empreendimento é um conjunto complexo de operações de transformação ou de processos. Para SLACK et al. (2002), se um empreendimento tem a produção como função, significa que são produzidos bens e serviços para clientes externos. Se tiver a produção como atividade, na verdade os *outputs* desta operação podem ser destinados a clientes internos e/ou externos. Por exemplo, um fabricante de automóveis pode produzir partes ou peças que serão montadas em seu produto final, mas também pode destinar parte destas peças ao mercado de reposição para manutenção dos automóveis.

As atividades de transformação envolvem um grande número de operações sistematizadas e interligadas, internas e/ou externas, que devem ser controladas, estudadas e aperfeiçoadas uma a uma. Todo o conjunto de operações deve ser alinhado equilibradamente de forma a permitir que toda esta estrutura ou sistema, seja hábil em conciliar seus *outputs* com a posição estratégica de mercado.

A organização de sistemas de manufatura deve estar focada em alta produtividade, estabelecendo métodos e processos que mantenham as plantas de manufatura limpas, organizadas e enxutas. Produto e processos devem ser projetados em conjunto, o que possibilita prever que tipo e que quantidades de recursos são necessários.

O Layout deve reservar espaços mínimos para estoques de materiais e produtos, promover a utilização eficiente dos recursos bem como prover mínima movimentação de materiais e pessoas. A comunicação deve ser eficaz e as informações devem ser precisas e estar sempre disponíveis. Postos de trabalho devem ser projetados considerando os conceitos de ergonomia, proporcionando bem estar e segurança aos operadores.

3.4 - Produtividade das operações

Produtividade é o quociente entre *output* e *input* da operação. A abordagem mais tradicional é a da relação entre “*valor do produto e/ou serviço*” produzido e o “*custo dos insumos*” para produzi-lo, segundo MARTINS e LAUGENI (2001). O principal componente da valoração de um produto é o mercado e a posição estratégica do empreendimento em relação a este. Basicamente, pode-se estabelecer vantagem competitiva através da minimização dos custos de insumos, bem como do aumento da eficiência das operações, e, em concordância com SLACK e LEWIS (2003), com o desenvolvimento e conhecimento de processos acumulados ao longo de anos de experiência que formam as capacidades das operações.

Para MARTINS e LAUGENI (2001), as operações consistem de sistemas de transformação que são compostos por três elementos básicos. As entradas ou *inputs* representam o conjunto de todos os recursos necessários, tais como instalação, capital, mão de obra, tecnologia, energia, informações, etc. Os *inputs* são transformados em *outputs* ou saídas, pelas funções de transformação, que englobam decisões, processos, regras heurísticas, algoritmos matemáticos, modelos de simulação, julgamento humano, etc. Os *outputs* são os produtos manufaturados, serviços prestados, informações fornecidas ou processadas.

Outros conceitos importantes destacados por MARTINS e LAUGENI (2001), são os de “*eficácia, eficiência, desempenho ou performance, produtividade parcial e total*” dos sistemas produtivos. O não entendimento claro sobre o significado destes conceitos pode gerar algum tipo de confusão quando se pretende gerenciar indicadores de produtividade.

Eficácia é o quanto a operação e seus resultados reais se aproximaram dos objetivos previamente estabelecidos. Portanto uma operação é eficaz quando se iguala ou se supera os objetivos de desempenho atribuídos a esta através da estratégia de mercado. Concluindo, a eficácia é a forma de medirmos o quanto a operação está conciliada ou alinhada com os objetivos de performance de SLACK e LEWIS (2003). Desempenho ou performance para MARTINS e LAUGENI (2001) é o grau em que um sistema físico ou econômico atinge seus objetivos. É associado à eficácia de sistemas, ou seja, o quanto a operação é capaz de atingir os objetivos.

Eficiência, segundo MARTINS e LAUGENI (2001) é a relação entre o *output* da operação e o que se consumiu em sua produção (*input*), medidos em mesma unidade. Em sistemas físicos normalmente é um valor menor que 1, e em sistemas econômicos deve ser

maior que 1. Por exemplo, um produto deveria consumir uma (1) unidade de tempo na operação para ser transformado, mas consumiu na realidade uma e meia (1,5) unidades de tempo. Portanto a eficiência da operação foi de $1,0/1,5$ que resulta em eficiência de 0,67.

Produtividade parcial é a relação entre a medição do *output*, e o consumido na operação de *um* dos insumos (recursos) utilizados. Portanto podemos medir produtividades isoladas de mão de obra, de capital, de equipamentos, etc. Produtividade total, segundo MARTINS e LAUGENI (2001) é o quociente entre a medida do *output* gerado entre dois instantes *i* e *j* a preços do instante inicial, e a medida do *input* consumido entre os instantes *i* e *j*, também a preços do instante inicial:

$$PT_{ij} = O_{ij}/I_{ij}, \text{ onde:} \quad \dots(2)$$

PT_{ij} = produtividade total entre instantes *i* e *j*;

O_{ij} = *output* gerado entre instantes *i* e *j*;

I_{ij} = *input* consumido entre instantes *i* e *j*.

4 - SIMULAÇÃO

Para HARRELL et al. (2004), simulação é a imitação de um sistema dinâmico usando um modelo computacional com o objetivo de avaliar e melhorar o desempenho ou performance deste sistema.

Segundo PIDD (2004), desde os anos 1960 são desenvolvidos métodos de simulação computacional, e estes podem ter sido os mais utilizados entre todas as ferramentas analíticas da ciência da gestão. O princípio é simples, consiste em elaborar um modelo do sistema a ser estudado, escrever programas computacionais que incorporem o modelo e usar o computador para imitar o comportamento deste sistema quando sujeito a uma variedade de políticas operacionais. Desta forma, a política mais proveitosa pode ser selecionada.

Para HILLIER e LIEBERMAN (2006), a Simulação é a mais utilizada das técnicas da Pesquisa Operacional. Ela envolve o uso do computador para imitar a operação inteira de um processo ou de um sistema. Devido à capacidade computacional de simular o funcionamento de um sistema complexo em uma escala de tempo comprimida, a ferramenta possibilita a geração de cenários alternativos com relativa rapidez, e a comparação e avaliação do desempenho destas alternativas fornece uma base para escolha.

Simulação é experimentação para PIDD (2004). A simulação envolve a experimentação de um modelo computacional de qualquer sistema. O modelo usado é o veículo para experimentação em forma de tentativa e erro, em via de demonstrar os prováveis efeitos de diversas políticas. Aquelas que produzem os melhores resultados no modelo serão candidatas à implementação no sistema real.

4.1 - Pesquisa operacional e simulação

O crescimento do tamanho e da complexidade das organizações a partir da Revolução Industrial resultou em intrincados sistemas que configuram diversas ilhas especializadas em diferentes atividades ou operações, dentro e fora de empreendimentos, interligadas por elos de suprimento ao longo da cadeia produtiva. Segundo HILLIER e LIEBERMAN (2006), esta crescente especialização permitiu que a gestão destas ilhas de atividades se tornasse relativamente autônoma, desviando-se desta forma dos objetivos principais da organização

como um todo (*trade-off*). Outro problema oriundo da complexidade dos sistemas produtivos e/ou de serviços é a difícil alocação dos recursos disponíveis (ou necessários) para as diversas atividades de maneira que a operação como um todo seja eficiente. A necessidade de encontrar a melhor forma de gerenciar as operações e solucionar os intrincados problemas dos sistemas originou a pesquisa operacional.

A origem da pesquisa operacional remonta a pesquisas militares nos primórdios da Segunda Guerra Mundial. Ainda segundo HILLIER e LIEBERMAN (2006), as necessidades logísticas de se alocar de forma eficiente recursos escassos para diversas operações militares e atividades internas e de suporte, levaram os comandos britânicos e norte americanos a convocar cientistas para realização de pesquisas sobre operações táticas e estratégicas. Estas equipes de cientistas foram as primeiras de pesquisa operacional.

Na atualidade, a pesquisa operacional consiste de método científico quantitativo utilizado para investigar o problema empresarial. Para HILLIER e LIEBERMAN (2006), o processo quantitativo começa pela observação e formulação cuidadosa do problema incluindo todos os dados relevantes. Em seguida é construído um modelo científico matemático que tenta imitar ou abstrair a essência do problema real. Assumindo-se como hipótese de que este modelo é uma representação suficientemente precisa das características principais da situação estudada, e de que as soluções geradas pelo modelo também são válidas para o problema real, então são realizadas experimentações para testar esta hipótese, modificar o modelo se necessário, e eventualmente verificar hipóteses alternativas (validação do modelo).

Ainda conforme HILLIER e LIEBERMAN (2006), a vantagem da pesquisa operacional é a abordagem sistêmica, ou seja, conflitos de interesses entre unidades de uma organização podem ser solucionados alinhando as operações de cada setor com o objetivo principal da corporação. Além deste fator, a integração de todas as variáveis que influenciam as operações como um todo proporciona resultados mais confiáveis e abrangentes, que devem estar alinhados com os objetivos de desempenho provenientes do posicionamento estratégico no mercado, em concordância com SLACK e LEWIS (2003).

Um estudo de pesquisa operacional típico é composto das seguintes fases, segundo HILLIER e LIEBERMAN (2006): definição do problema e coleta de dados; formulação do modelo matemático para representar o problema; desenvolvimento do procedimento computacional que possibilite a derivação de soluções a partir do modelo; teste e aprimoramento do modelo se necessário; preparação para aplicação contínua do modelo prescrito pelos gestores; implementação.

Um problema de pesquisa operacional requer uma equipe multidisciplinar, com indivíduos altamente treinados em matemática, estatística, probabilidade, economia, administração de empresas, informática, engenharia, física, ciências comportamentais e técnicas especiais de pesquisa operacional. Uma destas técnicas especiais mais utilizadas segundo PIDD (2004) é a da Simulação.

Para HILLIER e LIEBERMAN (2006), a simulação oferece a mesma funcionalidade da pesquisa operacional quando do desenvolvimento ou projeto de procedimentos operacionais para algum sistema estocástico, ou seja, um sistema cuja operação evolui probabilisticamente ao longo do tempo. O desempenho do sistema real é imitado usando-se distribuições de probabilidades para geração aleatória de diversos eventos que ocorrem no sistema. Um modelo de simulação sintetiza o sistema construindo-o componente por componente e evento por evento. O modelo executa o sistema simulado para obter observações estatísticas do desempenho do sistema resultante de diversos eventos gerados aleatoriamente. Devido à necessidade de geração e processamento de um considerável volume de dados, a simulação requer o uso de computador.

4.2 - Aplicações da simulação computacional

PIDD (2004) afirma que é impossível mensurar quais técnicas de gestão são mais utilizadas na ciência da administração. Pesquisas ocasionais entre profissionais normalmente reportam o uso dos métodos de simulação entre os três mais utilizados. Os tópicos que seguem ilustram algumas das inúmeras áreas em que a aplicação da simulação é difundida e utilizada. A simulação pode ser utilizada em diversas áreas, tais como:

- **Sistemas de manufatura:** O desenvolvimento e a instalação de sistemas de manufatura requerem grande soma de investimentos em plantas de manufatura e sistemas integrados. É importante assegurar que a operação destes sistemas corresponda plenamente aos objetivos planejados. Segundo PIDD (2004), a simulação proporciona a comparação de desenhos alternativos e políticas de controle no modelo antes de começar a construção de uma planta física.

- **Sistemas de saúde:** A aplicação da simulação tem se expandido em sistemas de saúde do mundo todo, como por exemplo, distribuição de medicamentos, movimentação de bens e equipamentos em grandes hospitais de maneira eficiente, planejamento de departamentos de atendimento emergencial, etc. PIDD (2004) considera importante testar diferentes políticas sem colocar pacientes em risco, e/ou avaliar a eficácia de diferentes programas de tratamentos.
- **Re-engenharia de processos de negócio:** Ocorre que na realidade processos-chave (*core business*) dependem de uma vasta rede de diferentes processos. A simulação pode facilitar a compreensão de como estes processos interagem, e desta forma facilitar decisões pontuais de melhorias que influenciam o resultado de toda a operação.
- **Sistemas de transporte:** A simulação pode ser o meio para incrementar a eficiência e o efetivo emprego dos recursos em sistemas de transporte. Terminais aeroportuários envolvem planejamento de áreas para movimentação e espera de pessoas, bem como os meios para separação, identificação e movimentação de bagagens diversas. Também precisa prover terminais de embarque e desembarque das pessoas, bem como todo um sistema de informações e de atendimento. O dimensionamento de todos estes recursos pode ser auxiliado pela simulação. A simulação também pode ser utilizada no planejamento de tráfego de aeronaves, focando o melhor aproveitamento do espaço aéreo condicionado à segurança das aeronaves. Analogamente, segundo PIDD (2004), sistemas metroviários, sistemas de trânsito de automóveis, de embarcações, etc., também são passíveis de aplicação da simulação, seja para planejamento, para dimensionamento, ou para melhoria de sistemas existentes.
- **Sistemas de defesa:** O setor de defesa é também usuário de técnicas de simulação computacional. As aplicações vão desde estudos de operações logísticas até simulações de batalhas, onde são investigadas possíveis estratégias e táticas a serem utilizadas na defesa ou em ataques. PIDD (2004) argumenta que o apelo da simulação é obvio. Nenhum comandante de batalha quer ser derrotado, e a possibilidade de desenvolver e testar táticas antecipadamente e de preparar medidas defensivas é de grande importância.

4.3 - Quando simular?

PIDD (2004) considera duas abordagens que fornecem uma base para indicação da simulação de modelos, sendo a primeira confrontando a simulação com a experimentação direta real, e a segunda, confrontando a simulação com a modelagem matemática.

Considerando a experimentação real, a simulação apresenta as seguintes vantagens segundo PIDD (2004):

- Custo: apesar de necessitar de tempo e de programador experiente, experimentos reais são muito mais custosos;
- Tempo: há um consumo significativo de tempo para gerar o modelo computacional, todavia, a simulação do modelo pode comprimir o tempo, o que significa que é possível simular um experimento real que consumiria anos em semanas;
- Reprodução: um dos fundamentos de experimentos científicos é que estes possam ser reproduzidos, o que em experimento real de um sistema complexo é muito difícil, já o modelo computacional é precisamente replicável;
- Segurança: condições extremas podem ser simuladas sem prejuízo real da saúde de pessoas, evitando atividades experimentais ilegais ou nocivas;
- Legalidade: é possível investigar o efeito de alterações da legislação em sistemas, como por exemplo, medir a performance de entregas quando de modificações da legislação que regulamenta a carga de trabalho diária de motoristas.

Para PIDD (2004), considerando a possibilidade de uso de modelagem matemática do sistema, é preciso levar em conta que muitos modelos matemáticos não incorporam satisfatoriamente os efeitos dinâmicos ou transitórios, ao invés disso, trabalham com valores médios desconsiderando variações estatísticas, ou seja, estes modelos lidam melhor com variáveis que apresentem comportamento determinístico e não estocástico.

Segundo HILLIER e LIEBERMAN (2006), a simulação deve ser utilizada quando o sistema estocástico estudado for muito complexo e de difícil modelagem matemática, apesar de que, quando esta técnica apresentar-se factível é a mais recomendada. Modelos matemáticos muito complexos também podem incorrer em erros na sua construção, bem como podem ser de difícil processamento computacional o que dificulta a obtenção das soluções.

4.3.1 - Sistemas determinísticos

Conforme PIDD (2004) um sistema é determinístico se seu comportamento for inteiramente previsível. Desde que este sistema possa ser perfeitamente compreendido, então é possível prever precisamente o que pode acontecer. Um ciclo de operação em uma máquina automática pode ser determinístico considerando esta abordagem. Cada repetição de idênticos ciclos irá consumir a mesma extensão de tempo a menos que as condições que influenciam o tempo de ciclo sejam alteradas.

4.3.2 - Sistemas estocásticos

Um sistema é estocástico, segundo PIDD (2004), se seu comportamento não pode ser inteiramente previsto, apesar de que alguns dados podem ser obtidos através da probabilidade da ocorrência em que certos eventos irão acontecer. Por exemplo, levantamentos estatísticos podem ser feitos sobre uma variável “*tempo de leitura*” para a leitura de um mesmo texto por pessoas distintas. Poderia ser obtida, para ilustrar, uma média de 50 minutos com desvio padrão de 3 minutos, considerando que a leitura apresenta uma distribuição normal. Neste caso seria impossível precisar a duração da leitura para um indivíduo particular, o que configura um evento de cujo comportamento não pode ser completamente controlado. Em algumas percepções, a distinção entre sistemas estocásticos e determinísticos é artificial. Isto é mais um resultado da soma de conhecimentos sobre o sistema ou do quanto um observador exerce de controle sobre este sistema. Todavia, simulações estocásticas e determinísticas são possíveis.

4.4 - Simulação de eventos discretos

Para HILLIER e LIEBERMAN (2006) a simulação de eventos discretos é aquela em que mudanças de estado ocorrem instantaneamente em pontos aleatórios no tempo como resultado da ocorrência de eventos discretos. Por exemplo, a chegada de um indivíduo em uma fila, ou a saída de outro da mesma, configuram eventos discretos pelo fato de mudarem instantaneamente o número (quantidade) de pessoas desta fila. Neste caso o sistema é a fila e o estado do sistema é o número de pessoas na fila. Este sistema exemplo poderia ser um posto de serviços em que a chegada de clientes obedece a um critério aleatório estocástico, e a saída do cliente depende da finalização de um serviço de atendimento que demanda de um tempo para execução que também pode sofrer variações estatísticas, porém é finito. A maioria das aplicações de simulação é utilizada para eventos discretos.

4.5 - Simulação contínua

É aquela em que as mudanças de estado dos sistemas ocorrem continuamente ao longo do tempo, segundo HILLIER e LIEBERMAN (2006). Por exemplo, a posição relativa de uma aeronave em vôo configura o estado do sistema, que neste caso é a aeronave em deslocamento. Desta forma, o estado do sistema muda continuamente ao longo do tempo. Este tipo de simulação requer a utilização de equações diferenciais para definir as taxas de variação de estado dos sistemas, o que implica em análises complexas e dificuldade de modelagem. Realizando-se aproximações das mudanças contínuas de estado por mudanças ocasionais discretas a certos intervalos de tempo, muitas vezes torna-se possível a utilização de simulação discreta com resultados aproximados do modelo contínuo.

4.6 - Filas de espera

Para HILLIER e LIEBERMAN (2006), as filas constituem um fator gerador de grandes ineficiências, seja no atendimento de pessoas por um sistema qualquer, por exemplo, atendimento de saúde, bancos, supermercados, pedágios, etc., seja em máquinas produtivas esperando por reparos, veículos de transporte esperando pela descarga que podem atrasar carregamentos posteriores, aviões esperando para aterrissar que também podem atrasar o embarque de pessoas. Congestionamentos de linhas e sistemas de telecomunicações podem provocar perda de dados e de informações, ordens de produção em espera podem atrasar ordens posteriores, atrasos na execução de serviços podem acarretar perda de negócios.

A teoria das filas é o estudo destas diversas formas de espera. Estes estudos foram fundados por A. K. Erlang em 1905. Segundo HILLIER e LIEBERMAN (2006), a teoria usa modelos de filas para representar diversos sistemas de filas. Estes modelos de fila consideram especialmente o tempo de espera médio que ocorrerá sob determinadas circunstâncias. São úteis para determinar como operar um sistema de filas de forma mais eficiente, permitindo a análise e o dimensionamento da capacidade de atendimento de forma que não provoque esperas excessivas e suas conseqüências negativas. Os modelos permitem encontrar um equilíbrio apropriado entre custo de serviço e tempo de espera.

Um processo básico de filas, conforme HILLIER e LIEBERMAN (2006), é composto por uma “*fonte de entradas*” de onde são provenientes os “*elementos*” que chegam ao sistema ao longo do tempo, estes elementos pegam uma “*fila*” ao entrar no “*sistema de filas*”. Em certos momentos um dos elementos da fila é selecionado para atendimento ou processamento segundo uma regra que é a “*disciplina da fila*”. O atendimento (processamento) deste elemento é proporcionado pelo “*mecanismo de atendimento*”, e, após o término deste processo o elemento sai do sistema de fila, como ilustrado na Figura 5 que segue.

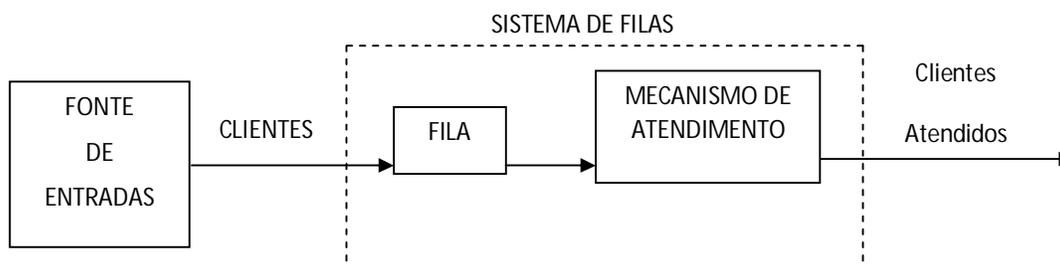


Figura 5 - Processo básico de fila

Fonte: HILLIER e LIEBERMAN, 2006.

Uma das características da fonte de entradas, ainda segundo HILLIER e LIEBERMAN (2006), é o seu tamanho que é definido pela quantidade ou número de elementos distintos que pode ser finita ou infinita. A origem destes elementos é denominada população solicitante. Outra característica é o tempo entre chegadas dos elementos. As chegadas ocorrem aleatoriamente, porém, apresentam um tempo médio de intervalo, assemelhando-se hipoteticamente a uma distribuição estatística de Poisson. Outra hipótese é a de que os intervalos de chegada comportem-se como uma distribuição exponencial. De qualquer maneira, para a modelagem do problema, é necessário indicar um padrão estatístico para os intervalos de tempo entre chegadas dos elementos.

A fila é o local onde as entidades aguardam antes do atendimento. É caracterizada pelo número de elementos que pode conter, finito ou infinito. A disciplina de fila refere-se à ordem na qual os elementos da fila são selecionados para atendimento. Poderia ser aleatória, primeiros que chegam primeiros a sair, ou outra regra qualquer.

Ainda segundo HILLIER e LIEBERMAN (2006), o mecanismo de atendimento pode ser composto por uma ou mais instalações de atendimento, sendo cada uma destas, composta por um ou mais canais de atendimento paralelos, denominados atendentes. Estes canais de atendimento também podem estar dispostos em série, onde a entidade sofre seguidos processos em sequência. O tempo decorrido entre o início e o término do atendimento prestado a uma entidade em uma instalação é denominado tempo de atendimento. O modelo também deve determinar qual a distribuição probabilística do tempo de atendimento para cada atendente.

Problemas reais envolvem várias filas de vários tipos ao longo de sistemas de processos, ou seja, estes problemas são compostos por intrincados sistemas de filas. HILLIER e LIEBERMAN (2006) apontam quatro tipos básicos de sistemas de filas. Os sistemas de atendimento comercial envolvem atendimento de pessoa a pessoa em um local permanente,

por exemplo, barbearia ou caixas de banco. As entidades atendidas não necessariamente são pessoas, podem ser carros para abastecimento, eletrodomésticos para concerto, etc. Os sistemas de atendimento de transportes podem ser caminhões ou navios aguardando descarga, filas de semáforos, aviões aguardando para pouso ou decolagem, estacionamentos, etc. Os sistemas de atendimento interno envolvem sistemas de movimentação de materiais, sistemas de manutenção, estações de inspeção, máquinas, atendimento a pessoal, etc. Por fim, os sistemas de serviços sociais, como serviços de saúde, sistema judicial, sistemas legislativos, etc.

Considerando os exemplos de sistemas de filas citados por HILLIER e LIEBERMAN (2006), pode-se abstrair quatro tipos de situações reais, ou de sistemas de filas. O primeiro é o de fila única com um canal de atendimento como ilustrado na Figura 5, por exemplo, um consultório médico. O segundo é o que apresenta fila única com múltiplos canais de atendimento, por exemplo, atendimento em agencia bancária. O terceiro tipo é onde ocorrem múltiplas filas e múltiplos canais de atendimento, como por exemplo, as filas dos caixas de supermercados ou pedágios. O quarto tipo representa problemas reais, apresentando intrincadas redes de filas que podem conter simultaneamente qualquer um dos três tipos anteriores. Como exemplo pode-se mencionar sistemas de manufatura onde entidades diferentes sofrem diversos processos distintos em diferentes locais, sejam processos de transformação, de controle, de montagem, etc.

Várias aplicações de simulação de eventos discretos envolvem sistemas de filas de diferentes tipos, conforme PIDD (2004). As filas podem ser formadas por trabalhos esperando ser processados em uma máquina, ou no empilhamento de aeronaves esperando autorização para aterrissar em um aeroporto. Outro caso seria o de incêndios esperando para serem controlados ou apagados que requerem o atendimento de bombeiros e seus equipamentos.

Outro exemplo seria o de uma linha de pintura de carrocerias de automóvel. As carrocerias sofrem diferentes processos, tais como limpeza, aplicação de fundo anti-corrosivo, pintura e secagem. São movidas entre áreas de processo por transportador aéreo, esteiras transportadoras, ou outras maquinarias. Normalmente, ao terminar cada processo intermediário, as carrocerias são elevadas e direcionadas a estoques intermediários até que a próxima área esteja disponível. Estes estoques funcionam segundo comportamento de filas, onde o primeiro que chega é o primeiro que sai, neste caso, com as entidades carrocerias aguardando o processo seguinte. Para PIDD (2004), toda uma variedade de sistemas pode ser compreendida como tendo uma estrutura de filas as quais caracterizam eventos discretos de simulação.

4.7 - Simulação usando *ProModel*

Para o estudo experimental deste trabalho foi utilizado o software comercial ProModel. Segundo HARRELL et al. (2004), o *ProModel* é um poderoso e fácil de usar, pacote de simulação comercial destinado para modelagem e processamento de qualquer evento discreto. Apresenta um tutorial interno que descreve a construção, a execução e a análise de dados de saída do modelo simulado.

A programação do modelo é simples e interativa, sendo que entidades e locais, bem como recursos e caminhos são representados graficamente. A sequência de programação do modelo em *ProModel* obedece às seguintes etapas:

- *Locations* (locais) - São os canais de atendimento ou os prestadores de serviços, que não se movimentam (permanecem fixos no mesmo local).
- *Entities* (entidades) - São os solicitantes de serviços.
- *Path Networks* (redes de caminhos) - Define a rede de caminhos a ser utilizada pelos recursos de movimentação.
- *Resources* (recursos) - São os prestadores de serviços que se movimentam pelo sistema.
- *Processing* (processos) - Descreve a trajetória das *entities* pelo sistema. É a lógica do processo, pois define qual a operação e o roteamento para cada tipo de entidade em cada local do sistema.
- *Arrivals* (chegadas) - Descreve a lei de chegada das *entities* no sistema.

Uma vez terminada a programação, imediatamente pode-se executar a simulação animada que oferece uma escala regulável para velocidade da simulação. Esta escala possibilita a compressão do tempo. A simulação pode ser configurada por um determinado período de tempo, ou pode-se rodar o modelo até finalizar determinados processos finitos.

Nesta fase, se houver algum erro de programa, o software apresenta telas amigáveis indicando as correções necessárias. O layout exibido pode ser configurado com elementos visuais do software sobrepostos sobre plantas reais de edificação importadas de arquivos gerados por *CAD* (desenho auxiliado por computador), ainda segundo HARRELL et al. (2004).

Os outputs gerados na execução do modelo são reunidos e apresentados em sintéticos e detalhados relatórios de várias medições de desempenho, apresentados em forma de tabelas, gráficos, histogramas, gráficos tipo torta, etc. O software também provém análise de intervalos de confiança entre outras análises de precisão. Saídas de múltiplos cenários alternativos podem ser sintetizadas e comparadas. Os dados reportados são claros e de fácil interpretação.

5 - DESENVOLVIMENTO DO ESTUDO

Em concordância com o objetivo deste estudo, a simulação em computador foi usada para analisar diferentes cenários de um mesmo sistema de manufatura, porém com diferenças no arranjo físico. As operações que serão simuladas integram um sistema hipotético composto por materiais, estoques, pessoas e máquinas ferramenta.

O layout inicial foi obtido com a aplicação do sistema SLP de MUTHER (1978) para coleta e organização dos dados, do conceito proposto por SLACK et al. (2002) de minimização de custos de movimentação de materiais e do modelamento matemático deste conceito indicado por HERAGU (2006). Este é o cenário inicial modelado e implementado com a utilização do software específico de simulação, *ProModel*. Buscou-se analisar as melhorias em produtividade ao se impor alterações no layout do cenário inicial, simulando a operação de cada cenário alternativo. Estas modificações foram orientadas pela análise dos dados de saída obtidos com a simulação, que contém informações sobre o aproveitamento dos recursos utilizados.

Foram escolhidos equipamentos de usinagem que são largamente utilizados neste tipo de manufatura, e estão presentes tanto em células e/ou sub-sistemas de grandes corporações, bem como em pequenas empresas do tipo *job-shop* que executam trabalhos sob encomenda.

Normalmente pequenas empresas não são sistemistas, mas sim especializadas em determinados tipos de operações. O mercado natural deste tipo de empreendimento consiste em fornecer a transformação de produtos não seriados, em pequenas quantidades ou lotes, e estes por sua vez não se repetem ao longo do tempo, ou não apresentam frequência de fornecimento bem definida e quantidades uniformes ao longo do tempo. Podem ser fornecedoras de peças trabalhadas sob encomenda e/ou pequenos subconjuntos mecânicos, como por exemplo, redutores e caixas de transmissão especiais.

Trata-se de um ambiente de mercado distinto, normalmente os clientes destes produtos e/ou serviços são fabricantes de bens de capital onde a escala de produção é muito reduzida e o produto final tende a ser muito customizado. Por exemplo, pode-se citar a fabricação de prensas transfer, de equipamentos para processamento e envase de bebidas, para processamento e embalagem de fármacos e de alimentos, equipamentos para indústria têxtil, química e petroquímica, indústria naval, aeronáutica, ferroviária, de cerâmicas, entre outras.

Nestes ambientes, a manufatura não chega a ser artesanal, mas ainda depende muito de mão de obra qualificada. Isto ocorre porque, devido às pequenas quantidades processadas e à grande variedade de diferentes produtos, a automação dos sistemas de transformação torna-se custosa e também limita a flexibilidade dos processos. Por este motivo, nas operações de manufatura destinadas a este ambiente de mercado específico, normalmente não encontramos sistemas totalmente automatizados, como os utilizados nas linhas de fabricação de produtos em massa. Algumas máquinas isoladas podem ser automatizadas, como por exemplo, centros de torneamento CNC, mas nem todas o são. Também não são automatizadas e nem mecanizadas as movimentações de materiais entre os diversos processos, justamente devido às variações de forma física, massa e quantidade de cada item produzido.

Considerando estas características de mercado e de operações de pequenas empresas de manufatura, a simulação deve incorporar estas condições particulares que são muito distintas das operações de produção de bens de consumo em grandes quantidades. Para a engenharia de produção é mais simples projetar, avaliar e implementar sistemas de produção que processem grandes quantidades de poucos diferentes produtos. Estes sistemas podem ter um alto grau de automação, podem ser totalmente integrados por sistemas de informação, e requerem pouca utilização de mão de obra, porém requerem tecnologia de ponta e investimentos de grande monta, além de apresentarem flexibilidade muito limitada.

5.1 - Produtos e quantidades considerados nos cenários analisados

No intuito de situar o sistema simulado dentro do contexto do ambiente de mercado de fabricação de bens de capital descrito acima, decidiu-se pela experimentação através da criação de um modelo de simulação da fabricação de cinco componentes fictícios distintos que integrariam um virtual subconjunto que poderia ser, por exemplo, um redutor mecânico especial de velocidades específico para aplicação em determinado projeto.

Foi simulada a fabricação de componentes para construção de vinte (20) unidades de subconjuntos, e cada um é composto por duas (2) unidades de *eixos*, doze (12) unidades de *engrenagens*, quatro (4) unidades de *flanges*, uma (1) unidade de *placa*, e uma (1) unidade de *caixa*, que sofrem transformação por diferentes sequências de processos. Portanto, supondo que o planejamento deste empreendimento virtual decida adquirir toda matéria prima de uma vez e produzir componentes para o lote de vinte redutores, será necessário fabricar: quarenta

(40) eixos; duzentas e quarenta (240) engrenagens; oitenta (80) flanges; vinte (20) placas; e vinte (20) caixas.

5.2 - Processos de cada componente

As máquinas ferramenta escolhidas para produção transformam a matéria prima gradualmente por uma série de etapas particulares de operações específicas, portanto, cada máquina é destinada a um processo particular, e a sequência de processos diferentes é que gera os produtos. Cada componente do experimento requer processos distintos em sequência que não pode ser mudada, e em cada processo é consumida uma quantidade de tempo por operação.

Em sistemas reais, os tempos de processo em cada máquina apresentam comportamento estocástico, ou seja, sofrem variações que podem ser caracterizadas por algum comportamento probabilístico. Os softwares de simulação conseguem incorporar e reproduzir estas aleatoriedades quando são informadas as distribuições estatísticas e os limites de variação que regem o comportamento dos tempos de processo. Segundo PIDD (2004), os simuladores podem trabalhar com variáveis determinísticas e/ou estocásticas. Para este estudo foram adotados tempos de processo determinísticos. Isto porque os tempos de processamento nas máquinas não são alterados de cenário em cenário, permanecendo como parâmetros fixos e comuns entre todos cenários simulados. Como o foco é verificar se alterações no layout provocam diferenças em produtividade, para este estudo não é necessária a atribuição de comportamentos estocásticos aos tempos de processamento, além do fato de que se trata de um sistema fictício.

A movimentação dos materiais entre os processos é efetuada por operadores, e estes por sua vez também operam as máquinas, portanto, devem acompanhar as operações de usinagem durante o tempo de processamento. Os operadores podem movimentar-se entre estações em vazio (sem carregar quaisquer produtos), ou podem movimentar-se (andar) carregando apenas uma unidade de cada vez de um produto qualquer entre estações com velocidade de 50 metros por minuto. Esta velocidade foi adotada para a simulação baseada em estudos de tempo utilizados por grandes empresas e também por aproximar-se das recomendações de tempos pré determinados *Basic-MOST (Maynard Operation Sequence Technique, ZANDIN (2003))*. Não foram introduzidas modificações de velocidade dos

operadores entre cenários alternativos, portanto não é importante obter-se um dado ergonômico de precisão para este estudo em função dos objetivos estabelecidos. Na implementação de sistemas reais, os dados ergonômicos adquirem grande importância por afetarem diretamente as condições de trabalho dos operadores e sua produtividade, bem como oferecem parâmetros para o estudo de tempos e métodos de cada processo.

O modelo simula o uso de cinco máquinas: serra (M1); torno mecânico (M2); torno CNC (comando numérico computadorizado) (M3); fresadora (M4); e furadeira (M5), que executam respectivamente os processos de serramento; torneamento convencional; torneamento CNC; fresamento; e furação.

O componente *eixo* (P1) passa pelas seguintes máquinas com os seguintes tempos de processo por unidade: serra (M1), 1 minuto; torno mecânico (M2), 4,75 minutos; fresadora (M4), 1,5 minutos; furadeira (M5), 0,75 minutos; e permanece na expedição por 3 minutos antes de sair do sistema. A *engrenagem* (P2) consome por unidade de: serra (M1), 4,5 minutos; torno CNC (M3), 2,5 minutos; furadeira (M5), 1,5 minutos; fresadora (M4), 4,5 minutos; permanecendo 3 minutos na expedição também. A *flange* (P3) consome por unidade: torno CNC (M3), 3 minutos; furadeira (M5), 4 minutos; e demora 3 minutos para embarcar. Cada *placa* (P4) requer: fresadora (M4), 3,75 minutos; furadeira (M5), 4,5 minutos; demorando 5 minutos na expedição. A *caixa* (P5) precisa de: fresadora (M4), 6 minutos; torno mecânico (M2), 9 minutos; furadeira (M5), 3,75 minutos; com espera de 8 minutos na expedição (Tabela 1).

Tabela 1- Sequência e tempos de operação por componente em minutos.

componente	quantidade	descrição	operação 1	t (1)	operação 2	t (2)	operação 3	t (3)	operação 4	t (4)	t (operação)
P1	40	eixo	M1	1	M2	4,75	M4	1,5	M5	0,75	320
P2	240	engrenagem	M1	4,5	M3	2,5	M5	1,5	M4	4,5	3120
P3	80	flange	M3	3	M5	4					560
P4	20	placa	M4	3,75	M5	4,5					165
P5	20	caixa	M4	6	M2	9	M5	3,75			375
										soma	4540

Fonte: Autor.

Os tempos alocados para as peças acabadas na expedição (S) podem ser entendidos como tempo de inspeção e/ou de embalagem para embarque. Não são relevantes para o sistema modelado, tendo como único objetivo permitir visualizar os componentes no local de saída e impor ao modelo a movimentação dos componentes para este ponto pelos operadores.

5.3 - Elaboração do layout inicial

Para SLACK et al (2002) o posicionamento relativo entre as estações de trabalho depende da intensidade de movimentação de materiais entre si. Para este estudo, adotou-se que cada peça é movimentada pelos operadores uma de cada vez. Portanto, a intensidade de movimentação pode ser entendida diretamente como a quantidade de peças movimentadas entre as estações seguindo a sequência de operações definida para cada componente.

5.3.1 - Carta de processos múltiplos

A carta de múltiplos processos (Figura 6) ilustra as movimentações entre os setores obedecendo as sequências de processos definidas na Tabela 1. É importante notar que existem fluxos contrários (cruzados) entre estações. Por exemplo, o eixo P1 é deslocado de M4 para M5 entre as operações 3 e 4 enquanto a engrenagem P2 é deslocada de M5 para M4 entre as operações 3 e 4. Estes fluxos devem ser somados para compor a intensidade de movimentação entre M4 e M5.

O setor “entrada” (E), não representa uma atividade, mas apenas um ponto de chegada das entidades no sistema. Este é o ponto em que os operadores retiram entidades e as transportam para as suas respectivas operações iniciais. Serve apenas para direcionar o fluxo dos componentes no sistema e não deve ser entendido como um estoque de entrada. Os materiais poderiam estar armazenados em sua totalidade em outro local da planta fora do sistema estudado, e então seriam direcionados ao ponto de entrada (E) conforme instruções de planejamento. A localização dos pontos de entrada (E), e de expedição (S) é importante pelo fato de que concentram a passagem de todos os componentes no sistema, bem como direcionam os trajetos dos operadores nas movimentações.

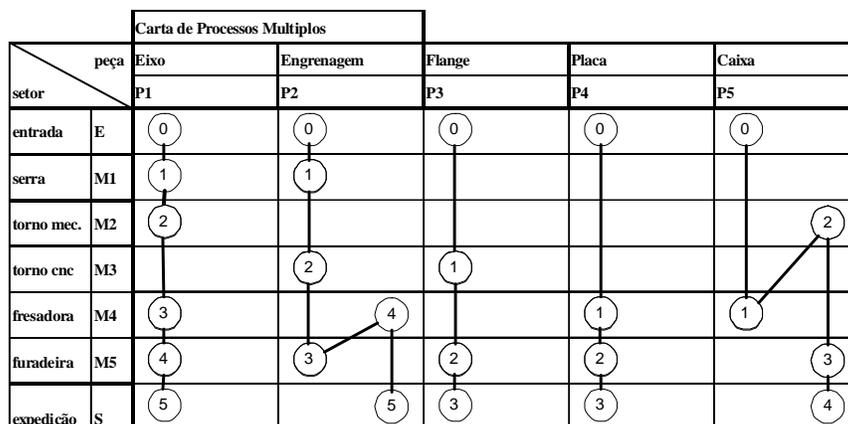


Figura 6 - Carta de processos múltiplos

Fonte: Autor.

5.3.2 - Intensidade de movimentação entre atividades

A definição de intensidade de movimentação, adotada neste estudo, é a quantidade de peças movimentadas pelos operadores entre os locais, uma vez que são movimentadas uma a uma pelos operadores (TOMPKINS et al (2003)). A análise conjunta das quantidades processadas indicadas na Tabela 1 e dos fluxos ilustrados na Carta de processos múltiplos (Figura 6) fornece os elementos para a montagem da Tabela 2 que segue.

Tabela 2 - Intensidade de movimentação entre setores

fluxos	componente/quantidade				Total
E - M1	P1= 40	P2= 240			280
E - M3	P3= 80				80
E - M4	P4= 20	P5= 20			40
M1 - M2	P1= 40				40
M1 - M3	P2= 240				240
M2 - M4	P1= 40				40
M2 - M5	P5= 20				20
M3 - M5	P2= 240	P3= 80			320
M4 - M5	P1= 40	P4= 20			60
M4 - S	P2= 240				240
M4 - M2	P5= 20				20
M5 - S	P1= 40	P3= 80	P4= 20	P5= 20	160
M5 - M4	P2= 240				240

Fonte: Autor.

5.3.3 - Carta de / para

A carta de / para (Tabela 3) é uma compilação da Tabela 2 incluindo-se todas as máquinas e os pontos de entrada (E) e de saída (S) que serão arranjados na planta. O diagrama da Figura 7 mostra os fluxos simétricos somados em ambos os sentidos, apresentando a movimentação total entre pares de máquinas e/ou de máquinas e pontos de entrada ou saída.

Tabela 3 - Carta De / Para

Carta De / Para (fluxo e intensidade de movimentação)							
DE \ PARA	E	M1	M2	M3	M4	M5	S
E		280	0	80	40	0	0
M1	0		40	240	0	0	0
M2	0	0		0	40	20	0
M3	0	0	0		0	320	0
M4	0	0	20	0		60	240
M5	0	0	0	0	240		160
S	0	0	0	0	0	0	

Fonte: Autor.

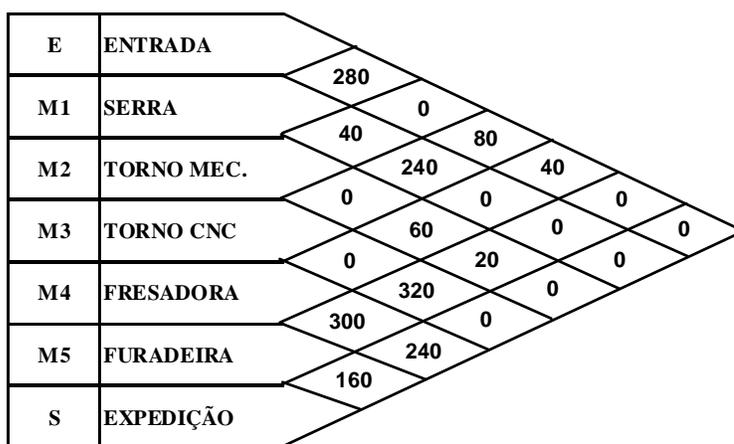


Figura 7 - Diagrama de fluxos ou intensidade de movimentação entre estações

Fonte: Autor.

5.3.4 - Escolha e aplicação do procedimento

De posse dos dados de fluxo entre estações, estabelecidos com o uso da técnica SLP de MUTHER (1978), podem ser adotados diferentes procedimentos para elaboração de um layout inicial. Ao invés de seguir utilizando-se a mesma abordagem, optou-se pelo uso do conceito de minimização de custos de movimentação de SLACK et al. (2002), como base para o modelamento matemático indicado por HERAGU (2006), capaz de gerar indicações de combinações entre estações para montagem do layout, adotando-se que estas possuem áreas e lados iguais e estarão dispostas linearmente na planta (Figura 8).

Os pontos Entrada (E) e Expedição (S) não foram incluídos nesta análise porque não possuem áreas definidas e representam apenas pontos de referência para a movimentação dos materiais pelos operadores. Estes pontos não devem ser entendidos como estoques e devem ocupar um espaço mínimo na planta. Podem ser alocados posteriormente aproximando-os das estações com maior fluxo de entrada e de saída respectivamente.

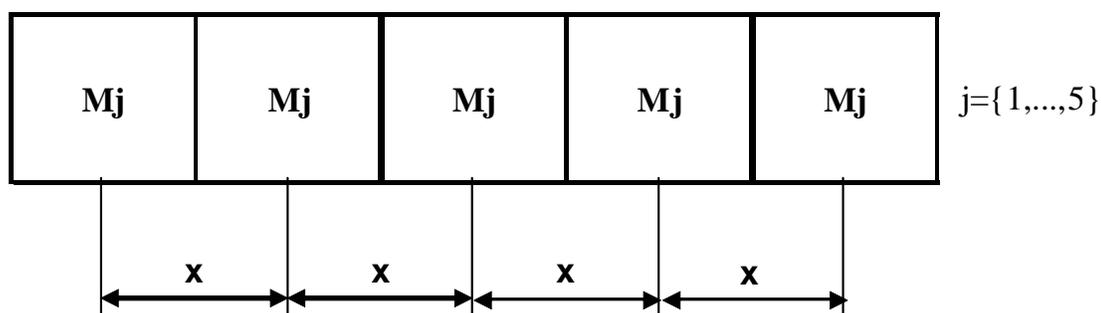


Figura 8 - Disposição adotada das estações na planta

Fonte: Autor.

Para este problema com cinco (5) máquinas, há 120 soluções possíveis. As permutações são dadas por $P(5) = 5! (= 120)$ permutações possíveis. Para cada uma destas combinações há um correspondente custo de movimentação total do arranjo dado pela Somatória dos Fluxos (F) x Distância (d) x Custo (c). A melhor solução é a que apresenta o menor custo total, conforme SLACK et al. (2002).

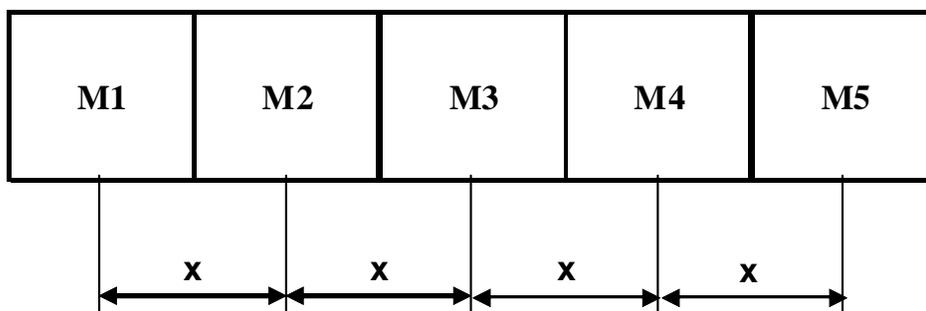


Figura 9 - Alocação inicial (exemplo)

Fonte: Autor.

Como foram adotadas estações iguais em forma e em área, as disposições simétricas apresentarão custos totais iguais. Desta forma ainda haveria $120/2 = 60$ combinações diferentes para analisar. Adotando-se uma combinação qualquer (Figura 9), o custo total (C_t) é calculado da seguinte maneira:

$$C_t = \sum F_{i,j} \cdot c_{i,j} \cdot d_{i,j} \text{ para todo } i \neq j \text{ onde:} \quad \dots(3)$$

C_t = custo total de movimentação do layout.

$c_{i,j}$ = custo por unidade de distância percorrida para movimentação de componentes entre centros de trabalho i e j .

$d_{i,j}$ = distância entre as máquinas i e j .

$F_{i,j}$ = fluxo em carregamentos ou quantidade de componentes por período, movimentados do centro de trabalho i para o centro j .

Considerando-se apenas os fluxos (intensidades de movimentação) entre máquinas indicados no diagrama da Figura 7, temos:

$$C_t = F_{1,2} \cdot c \cdot d_{1,2} + F_{1,3} \cdot c \cdot d_{1,3} + F_{2,4} \cdot c \cdot d_{2,4} + F_{2,5} \cdot c \cdot d_{2,5} + F_{3,5} \cdot c \cdot d_{3,5} + F_{4,5} \cdot c \cdot d_{4,5} \quad \dots (4)$$

Como o custo de movimentação por unidade de distância ($c_{i,j} = c$) é idêntico para todos os fluxos, este pode ser desconsiderado para efeito de comparar diferentes alocações. Também já são conhecidos os fluxos ($F_{i,j}$) que quantificam as intensidades de movimentação

entre estações. Com estes valores já definidos mostrados no diagrama da Figura 7, a função objetivo para este problema pode ser montada da seguinte maneira:

$$\text{Min } 40d_{1,2} + 240d_{1,3} + 60d_{2,4} + 20d_{2,5} + 320d_{3,5} + 300d_{4,5} \quad \dots(5)$$

Sujeito a:

$$1 \leq d_{i,j} \leq 4 \text{ (para as 5 alocações, } d \text{ varia de } 1x \text{ até } 4x) \quad \dots(6)$$

$$d_{1,2} + d_{1,3} + d_{2,4} + d_{2,5} + d_{3,5} + d_{4,5} = 11 \quad \dots(7)$$

Onde 11 é um valor inicial obtido pela soma do número de deslocamentos “x” entre estações caso as máquinas estejam arranjadas como indicado na Figura 9.

$$d_{1,2} = 1x \quad \dots(8)$$

$$d_{1,3} = 2x \quad \dots(9)$$

$$d_{2,4} = 2x \quad \dots(10)$$

$$d_{2,5} = 3x \quad \dots(11)$$

$$d_{3,5} = 2x \quad \dots(12)$$

$$d_{4,5} = 1x \quad \dots(13)$$

$$\rightarrow d_{1,2} + d_{1,3} + d_{2,4} + d_{2,5} + d_{3,5} + d_{4,5} = 11x \quad \dots(14)$$

Trata-se de uma aproximação porque ainda não existe um layout com alocações definidas para que se possa determinar com precisão os deslocamentos e distâncias percorridas. Por hora é adequado para a elaboração e implementação de um modelo matemático de Programação Linear. Processando o modelo no Software *LINDO*, obteve-se o resultado mostrado na Tabela 4.

Tabela 4 - Valores da função objetivo e das variáveis

VALOR DA FUNÇÃO OBJETIVO	
d = 1120	
VARIÁVEL	VALOR
d12	3
d13	1
d24	1
d25	4
d35	1
d45	1

Fonte: Processamento usando software *LINDO*.

A partir destes resultados pode-se montar um arranjo inicial (Figura 10) e é importante salientar que apesar de o modelo ter retornado quatro (4) valores de uma unidade (1) para as distâncias entre estações, é preciso arranjá-las em ordem decrescente dos coeficientes das variáveis d na função objetivo. O valor 1 retornado para a variável d significa que $d = x$, portanto estas áreas devem ser fronteiriças. Pelo fato de existir uma limitação física que determina locais alinhados na planta, pode ocorrer que não seja possível manter todas as vizinhanças indicadas pelo resultado do modelo, o que justifica observar os coeficientes destas variáveis como segundo parâmetro para a alocação de estações.

Em conformidade com este raciocínio, o primeiro par de estações a ser alocado na planta deve ser o M3, M5. O segundo par deve ser o M4, M5. Em terceiro lugar o par M1, M3 e em quarto o par M2, M4. Para todos estes pares de máquinas alocados na planta, o resultado obtido foi $d = 1x$. Note-se que a esta altura já foram preenchidos todos os locais disponíveis na planta como mostrado no item D da Figura 10.

Posteriormente deveriam ser verificadas as alocações dos pares M1, M2 para o qual o resultado obtido foi $d = 3x$, e, por último do par M2, M5 onde $d = 4x$, mas a limitação física impede que se façam novas alocações ou ajustes, considerando-se que as alocações fronteiriças e de maior intensidade de movimentação não devem ser modificadas.

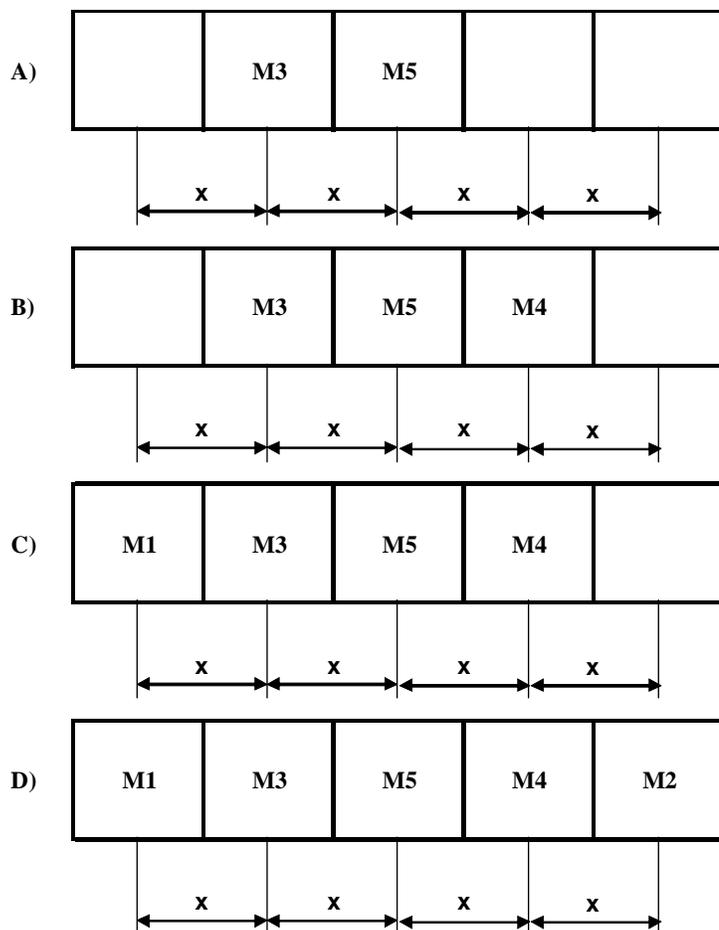


Figura 10 - Montagem do arranjo inicial

Fonte: Autor.

Importante observar que não foi possível satisfazer todas as condições geradas pelo modelo matemático processado. Para o par M1, M2, o modelo indicou uma distância $d = 3x$, mas a limitação física impôs $d = 4x$. Para o par M2, M5, o modelo retornou $d = 4x$, e na planta obteve-se $d = 2x$. As demais condições que indicaram locações fronteiriças ($d = 1x$) foram todas satisfeitas. Esta ocorrência não invalida o layout obtido, porém o resultado da função objetivo ($d=1120x$) não espelha mais a realidade deste arranjo. Agora é possível recalcular o novo resultado introduzindo os dados do arranjo inicial obtido na mesma função objetivo do modelo:

$$\text{Min } 40d_{1,2} + 240d_{1,3} + 60d_{2,4} + 20d_{2,5} + 320d_{3,5} + 300d_{4,5} \quad \dots(15)$$

$$\rightarrow 40*4x+240*1x+60*1x+20*2x+320*1x+300*1x = 1120x \quad \dots(16)$$

Por coincidência, o afastamento das estações M1, M2 no layout inicial foi compensado pela aproximação das estações M2, M5, e o resultado da função objetivo para o layout inicial obtido apresentou-se exatamente igual ao resultado $d=1120x$ retornado pelo processamento, mesmo com as aproximações que foram feitas para fechar o modelo através das restrições.

Para finalizar o layout inicial é necessário localizar os pontos de entrada e de expedição que direcionarão as movimentações dos operadores na planta. Como não se tem áreas definidas para estes dois pontos, uma vez que se presume que não ocorrerá acúmulo de estoques na planta, estas posições foram alocadas próximas das estações em que ocorrem os maiores fluxos de materiais como ilustrado na Figura 11.

Voltando ao diagrama da Figura 7, observa-se que o ponto de entrada deve estar próximo da estação M1 (serra) cuja intensidade de movimentação é de 280 e, se possível, também das estações M3 (torno CNC; intensidade 80) e M4 (fresadora; intensidade 40). O ponto de saída ou expedição deve ser posicionado próximo da estação M4 (fresadora; intensidade 240), e próximo da estação M5 (furadeira; intensidade 160).

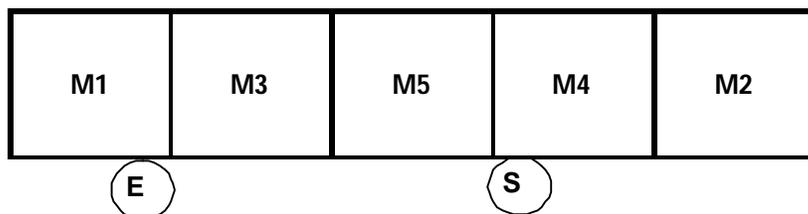


Figura 11 - Layout inicial

Fonte: Autor.

5.4 – Implementação e viabilização do modelo inicial usando o software *ProModel*

O processo de criação do modelo do sistema fictício em estudo no software simulador requer uma sequência de etapas:

- Desenho das estações de trabalho e das máquinas utilizadas em cada estação dispostas de acordo com o layout inicial da Figura 11. O desenho deve adotar uma escala métrica para que possa representar perfeitamente a o sistema e assim permitir a

comparação dos diferentes cenários considerados. Neste estudo, as estações foram desenhadas em AutoCAD e importadas para o simulador.

- Desenho dos locais de armazenamento temporário, ou estoques intermediários, que são ocupados por componentes em espera para ser processados, bem como locais de chegada e de saída do sistema. Neste estudo os locais de estocagem intermediária de cada estação foram denominados de Estoques de Entrada da Máquina j , ou apenas EEM_j , onde j é o número que identifica qual máquina está alocada na estação que contém a máquina M_j .
- Dimensionamento e desenho em escala dos caminhos definidos para movimentação dos componentes e dos recursos utilizados, no caso os operadores, formando uma rede de caminhos traçados na planta. Determinação dos pontos de interface dos caminhos com os estoques e máquinas. Atribuição de velocidades de traslado para os operadores.
- Definição dos componentes que são processados no sistema, incluindo seus desenhos ou figuras, para visualização de suas posições durante a animação da simulação.
- Definição das quantidades de componentes processados, das políticas planejadas para ingresso dos materiais no sistema e definição do local de entrada. Neste estudo todos os materiais para fabricação dos componentes chegam de uma vez no instante zero e são depositados na entrada E.
- Programação dos processos de transformação de cada componente, dos tempos consumidos por processo e das rotas (direcionamento) dos componentes entre as máquinas no sistema de acordo com a sequência estabelecida. A partir deste ponto já é possível simular o sistema.
- Verificação da necessidade de estoques intermediários simulando o sistema e verificando se todos componentes foram terminados. Se não foram isto indica bloqueios por falta de estoques e/ou de recursos de movimentação e operação.

- Dimensionamento dos estoques intermediários EEMj utilizando dados de bloqueios fornecidos pelo simulador de modo a permitir que todas as máquinas trabalhem efetivamente, evitando o desperdício de tempo estando paradas (bloqueadas) aguardando descarregamento do componente processado.
- Dimensionamento dos recursos de operação e de movimentação necessários. No caso deste estudo, os operadores estão encarregados de movimentar os componentes entre os locais e também ficam dedicados ao processo de transformação em execução, ou seja, acompanham a transformação junto da máquina utilizada, ou operam a máquina.

O cenário inicial montado no modelo, denominado *Cenário “A”*, inclui as cinco máquinas descritas no tópico anterior, um local de recebimento de materiais e um local de saída de produtos manufaturados. O layout foi montado considerando a alocação das estações e proporções do layout inicial da Figura 11.

A Figura 12 mostra o primeiro layout introduzido no simulador. Foram desenhadas estações de trabalho adotando-se forma quadrada de 5 metros de lado. Cada estação contém a máquina utilizada no processo e um local de entrada (EEMj) onde são colocadas as peças a serem processadas. Em um sistema balanceado (sistema ideal) não haveria necessidade destes estoques intermediários, entretanto, neste estudo ocorrem diferentes componentes com diferentes sequências de processos, fluxos opostos e cruzados, bem como diferentes tempos de processamento em cada estação, o que certamente gera a necessidade de estoques intermediários. Esta condição gera filas de espera por atendimento nas máquinas, e, não havendo locais capazes de abrigar estas filas, ocorre o bloqueio da máquina com o componente processado não podendo ser retirado para envio à máquina seguinte por esta também estar ocupada.

As linhas finas ligando estações na planta da Figura 12 representam os caminhos percorridos pelos operadores nas movimentações de peças, ou em vazio, quando o operador se desloca sem portar nenhum produto.

Distâncias percorridas: caminhos horizontais entre cada estação, 5 metros; caminhos verticais de acesso às máquinas, 2 metros; caminhos entre máquinas e estoques de entrada de cada estação, 1 metro.

O modelo de simulação é implementado no *ProModel* considerando o trajeto e as sequências de processo que cada componente sofre ao longo do sistema como indicado na Tabela 1. O processo foi modelado para cada componente, sendo que cada um sai do local de

entrada (E), segue para a máquina onde é realizado o primeiro processo (M_j), ou, se a máquina estiver ocupada, aguarda sua vez de processamento no estoque de entrada da estação (EEM_j). Em seguida o componente sofre um processamento que demanda um determinado tempo, e ao ser concluído, é removido pelo operador que o leva diretamente para a máquina que realiza a operação seguinte, se esta estiver livre, ou o deposita no estoque de entrada desta máquina caso ela esteja ocupada. O componente está pronto quando já passou por toda a sequência de processos programada, e, então é levado pelo operador ao local de saída (S) onde permanece por algum tempo e sai do sistema.

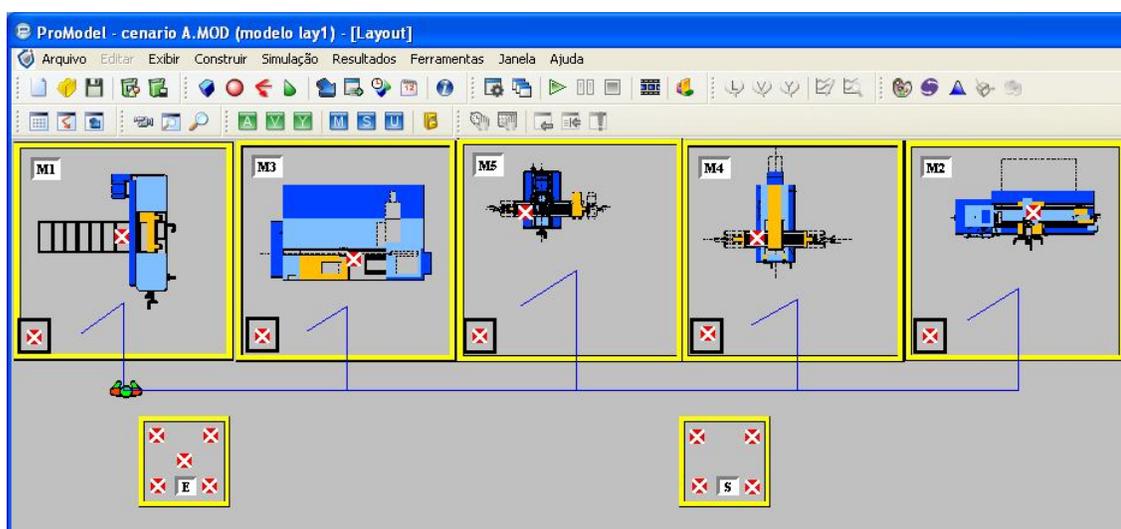


Figura 12 - Layout do Cenário “A”

Fonte: Autor.

5.4.1 - Verificação da necessidade de estoques intermediários

Se chegarem componentes em uma estação e a máquina estiver carregada ou processando outro componente, ocorre um bloqueio que pode gerar filas no estoque de entrada desta estação (EEM_j). Analogamente, uma máquina pode ser bloqueada se a máquina seguinte estiver carregada e o estoque de entrada da estação estiver com sua capacidade máxima ocupada. Com a simulação, os estoques de entrada das estações podem ser dimensionados analisando-se os bloqueios em cada máquina. Para o Cenário A, foram atribuídas capacidades iguais de 10 unidades para cada estoque de entrada das estações. Em seguida o sistema foi simulado como ilustrado na Figura 13.

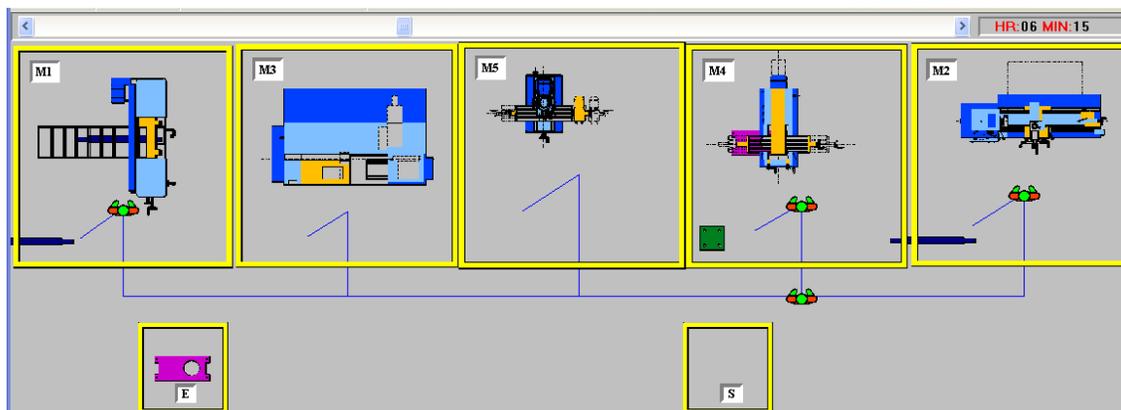


Figura 13 - Simulação do Cenário “A” com estoques das estações para até 10 unidades.

Fonte: Software ProModel

A simulação parou a animação no instante 6 horas e 15 minutos como ilustrado na Figura 13, porém pode-se notar no cenário que há peças na entrada, nos estoques de entrada das máquinas M1, M4 e M2, bem como aparecem máquinas carregadas M1 e M4 indicando prováveis bloqueios. O modelo deveria simular durante o tempo necessário para que todos os componentes fossem processados liberando por completo o sistema. É necessário analisar outros dados fornecidos pelo simulador para o entendimento do que aconteceu. A Tabela 5, fornecida pela simulação, mostra que apenas o lote de 80 flanges (P3) foi concluído e 10 unidades de placas (P4). Os demais componentes permanecem no sistema devido a algum bloqueio, provavelmente por estoques das estações insuficientes.

Tabela 5 - Componentes no sistema e saídas com capacidade de 10 componentes para cada EEMj.

Nome	Total de saídas	Quantidade no sistema
P1 eixo	0	40
P2 engrenagem	0	240
P3 flange	80	0
P4 placa	10	10
P5 caixa	0	20

Fonte: Software ProModel

Foram atribuídas paulatinamente capacidades maiores aos estoques de entrada das estações e realizadas sucessivas simulações até que todos os componentes foram processados e saíram do sistema como ilustrado na Tabela 6. Desta forma as capacidades de estoques de entrada de todas as estações do Cenário “A” foram fixadas em 26 unidades. Simulando-se este cenário com estoques intermediários de 26 unidades, obteve-se o tempo total consumido de 27 horas e 31 minutos.

Tabela 6 - Componentes no sistema e saídas com capacidade de 26 componentes para cada EEMj.

Nome	Total de saídas	Quantidade no sistema
P1 eixo	40	0
P2 engrenagem	240	0
P3 flange	80	0
P4 placa	20	0
P5 caixa	20	0

Fonte: Software ProModel

5.4.2 - Dimensionamento dos estoques intermediários

Ainda que o cenário simulado tenha concluído todas as operações consumindo o tempo total de 27 horas e 31 minutos, ainda há necessidade de dimensionar os estoques intermediários das entradas das estações. O correto dimensionamento destas filas permite que não ocorram bloqueios nas máquinas, evitando perda de tempo com componentes já processados que não podem ser retirados das máquinas por não haver disponibilidade no processo seguinte ou no seu estoque de entrada. A análise dos relatórios da simulação permite verificar bloqueios em cada máquina, e, confrontando estes dados com o sequenciamento das operações, é possível indicar quais estoques das estações precisam ser ampliados, bem como quais estão super dimensionados.

Os estoques de entrada das estações (EEMj) devem ser dimensionados de maneira que se eliminem os bloqueios de todas as máquinas e, ao mesmo tempo, apresentem o menor tamanho possível para não ocupar demasiado espaço na planta, influenciando negativamente o layout. Supõe-se também que o desbloqueio de todas as máquinas aumente o desempenho do sistema.

Partindo-se do maior percentual de bloqueios de máquinas da Tabela 7 fornecidos pela simulação, nota-se que a máquina M5 permanece bloqueada durante 36,2% do tempo.

Verificando-se quais os seqüenciamentos dos componentes que são processados nesta estação através da Tabela 1, tem-se que os componentes P1, P3, P4 e P5 passam por esta estação e são direcionados para a saída, não sofrendo mais processos. Isto indica a necessidade de se verificar a capacidade do estoque de saída (S). O componente P2 sai da máquina M5 e vai para a máquina M4 ou para o estoque de entrada desta estação, o que também pode indicar que o EEM4 esteja subdimensionado.

Tabela 7 - Aproveitamento das máquinas com estoques das estações de até 26 unidades.

Nome	% operação	% ociosa	% bloqueada
M1 serra	67,81	15,69	16,5
M2 torno mecanico	22,4	66,34	11,25
M3 torno cnc	50,86	38,93	10,22
M4 fresadora	80,83	11,42	7,66
M5 furadeira	52,98	10,82	36,2

Fonte: Software ProModel

Analisando os dados fornecidos pela simulação sobre utilização dos estoques mostrados na Tabela 8, nota-se que não há problemas com a capacidade de 5 unidades da saída (S), já que este local abrigou no máximo 4 componentes.

Por outro lado, o estoque EEM4 atingiu sua capacidade máxima de 26 unidades e teve 78,63% de utilização. Estes dados indicam que pode ser necessário ampliar sua capacidade. Foi adotada uma nova capacidade para o EEM4 de 110 unidades e feita nova simulação para novas análises, ainda no Cenário A, que indicou consumo de 27 horas e 33 minutos para terminar todos os componentes.

Tabela 8 - Dados de ocupação dos estoques com EEMj de 26 unidades.

Nome	Capacidade	Entradas	Conteúdo máximo	Conteúdo atual	% Utilização
E entrada	400	400	394	0	32,64
S saída	5	400	4	0	16,23
EEM3	26	92	26	0	31,48
EEM5	26	373	26	0	47,46
EEM4	26	305	26	0	78,63
EEM2	26	58	26	0	15,72
EEM1	26	26	26	0	89,18

Fonte: Software ProModel

Observa-se que o tempo total sofreu um acréscimo de 2 minutos em relação à simulação anterior. Isto pode estar indicando que talvez o bloqueio da máquina M5 não tenha influência no desempenho do sistema. Foram verificados novamente os bloqueios das máquinas (Tabela 9) e a utilização dos estoques (Tabela 10).

A Tabela 9 indica que a máquina M5 foi desbloqueada e que nova análise de estoques deve ser feita para desbloquear a máquina M1 que apresenta 17,35% do tempo bloqueada.

Tabela 9 - Dados de utilização das máquinas com EEM4 de 110 unidades.

Nome	% operação	% ociosa	% bloqueada
M1 serra	67,73	14,92	17,35
M2 torno mecanico	22,37	72,53	5,1
M3 torno cnc	50,8	38,78	10,42
M4 fresadora	80,73	13,03	6,15
M5 furadeira	52,91	47,09	0

Fonte: Software ProModel

Tabela 10 - Dados de ocupação dos estoques com EEM4 de 110 unidades.

Nome	Capacidade	Entradas	Conteúdo máximo	Conteúdo atual	% Utilização
E entrada	400	400	394	0	33,37
S saída	5	400	3	0	16,21
EEM3	26	85	26	0	29,83
EEM5	26	195	26	0	31,05
EEM4	110	318	40	0	22,53
EEM2	26	56	18	0	6,48
EEM1	26	26	26	0	90,26

Fonte: Software ProModel

O estoque EEM4 atingiu o máximo de 40 unidades, mas antes de diminuir sua capacidade máxima de 110 unidades, foram verificadas as capacidades os demais estoques para desbloquear todas as máquinas. Nota-se também que o estoque EEM2 apresentou ocupação máxima de 18 unidades, o que indica que, por hora não há necessidade de alterar sua capacidade. A capacidade do local de saída (S) também permaneceu viável com ocupação máxima de 3 unidades, menor que na simulação anterior em que atingiu 4 unidades, para uma capacidade máxima de 5.

Verificando-se quais componentes são processados na máquina M1, e os seus respectivos seqüenciamentos na Tabela 1, observa-se que: o produto P1 segue para a máquina M2 ou para o estoque de entrada EEM2, o produto P2 vai para máquina M3 ou para o estoque EEM3, os produtos P3, P4 e P5 não sofrem processos na máquina M1. Isto indica que os estoques EEM2 e EEM3 podem estar sub dimensionados. As capacidades destes estoques foram ampliadas para 110 unidades e foi realizada nova simulação.

Novamente o desempenho do sistema diminuiu com o aumento de 12 minutos no tempo total consumido que para esta configuração de estoques foi de 27 horas e 45 minutos. Isto pode estar indicando que com capacidades maiores nos estoques de entrada das estações, possivelmente ocorreram movimentações desnecessárias de componentes que podem estar sendo direcionados aos estoques intermediários por não encontrarem disponibilidade imediata nas máquinas para processamento, já que as capacidades dos estoques EEM2, EEM3 e EEM4

foram aumentadas de 26 para 110 unidades cada. Foram efetuadas novas análises de dados de bloqueios mostradas na Tabela 11, e também dos comportamentos dos estoques mostrados na Tabela 12.

Tabela 11 - Dados de utilização das máquinas com EEM2, EEM3 e EEM4 de 110 unidades.

Nome	% operação	% ociosa	% bloqueada
M1 serra	67,23	32,77	0
M2 torno mecanico	22,21	72,16	5,63
M3 torno cnc	50,42	38,2	11,38
M4 fresadora	80,13	13,06	6,65
M5 furadeira	52,52	47,48	0

Fonte: Software ProModel

Tabela 12 - Dados de ocupação dos estoques com EEM2, EEM3 e EEM4 de 110 unidades.

Nome	Capacidade	Entradas	Conteúdo máximo	Conteúdo atual	% Utilização
E entrada	400	400	394	0	22,09
S saída	5	400	3	0	16,09
EEM3	110	270	87	0	30,35
EEM5	26	198	26	0	31,19
EEM4	110	318	95	0	44,95
EEM2	110	56	18	0	1,58
EEM1	26	26	26	0	72,66

Fonte: Software ProModel

O bloqueio da máquina M1 foi eliminado como indica a Tabela 11. Observa-se também que não havia necessidade de aumento da capacidade do estoque EEM2 que continuou abrigando no máximo 18 componentes como indicado na Tabela 12. Já o estoque EEM4 passou a conter um máximo de 95 unidades quando na simulação anterior apresentou um máximo de 40 componentes (Tabela 10). Antes de diminuir a capacidade do estoque EEM2, optou-se por desbloquear a máquina M3 que apresenta 11,38% de bloqueio como mostra a Tabela 11. Como se observa nas diferentes simulações, a cada desbloqueio de máquinas quaisquer, as demandas nos estoques intermediários sofrem grande alteração.

Da Tabela 1 tem-se que os componentes P1, P4 e P5 não sofrem processos na máquina M3. Já os componentes P2 e P3 seguem da máquina M3 para a máquina M5 ou para o estoque EEM5. Isto indica a necessidade de analisar a capacidade do estoque de entrada da estação EEM5. A capacidade deste estoque foi elevada também para 110 unidades e foi realizada nova simulação.

Tabela 13 - Dados de utilização das máquinas com EEM2, EEM3, EEM4 e EEM5 de 110 unidades.

Nome	% operação	% ociosa	% bloqueada
M1 serra	67,97	32,03	0
M2 torno mecanico	22,45	77,55	0
M3 torno cnc	50,98	49,02	0
M4 fresadora	81,02	18,88	0
M5 furadeira	53,1	46,9	0

Fonte: Software ProModel

Com esta última alteração na capacidade do estoque EEM5, todas as máquinas foram desbloqueadas como mostra a Tabela 13. Isto significa que a eventual falta de capacidade do estoque EEM5 gera bloqueios também nas máquinas M2 e M4, como mostra a Tabela 11, além de bloquear a própria M3. Confirmando a hipótese de que os desbloqueios melhoram o desempenho do sistema, obteve-se tempo total de processamento de 27 horas e 27 minutos, o menor dentre todas as simulações anteriores. Com dos dados da Tabela 14 de ocupação dos estoques e com todas as máquinas desbloqueadas, é feito o dimensionamento final dos estoques intermediários para o Cenário “A”.

Tabela 14 - Dados de ocupação dos estoques com EEM2, EEM3, EEM4 e EEM5 de 110 unidades.

Nome	Capacidade	Entradas	Conteúdo máximo	Conteúdo atual	% Utilização
E entrada	400	400	394	0	22,33
S saída	5	400	4	0	16,26
EEM3	110	185	79	0	12,73
EEM5	110	282	93	0	22,79
EEM4	110	317	94	0	46,16
EEM2	110	56	18	0	1,09
EEM1	26	26	26	0	73,45

Fonte: Software ProModel

Observando-se os conteúdos máximos dos estoques obtidos pela simulação com todas as máquinas desbloqueadas, foi adotado o dimensionamento final para o Cenário “A” com as seguintes capacidades: entrada E, 400 unidades; saída S, 5 unidades; estoque de entrada EEM1, 26 unidades; estoque EEM2, 25 unidades; EEM3, 80 unidades; EEM4, 105 unidades; EEM5, 105 unidades (Tabela 15). Estas capacidades permaneceram fixas em todos os cenários com layouts alternativos simulados. Foi efetuada nova simulação do cenário com as capacidades dimensionadas e não se observaram bloqueios, nem capacidades insuficientes, e também não foi alterado o tempo total de operação do sistema.

Tabela 15 - Dimensionamento final dos estoques intermediários.

Nome	Capacidade	Entradas	Conteúdo máximo	Conteúdo atual	% Utilização
E entrada	400	400	394	0	22,33
S saída	5	400	4	0	16,26
EEM3	80	185	79	0	17,51
EEM5	105	282	93	0	23,87
EEM4	105	317	94	0	48,36
EEM2	25	56	18	0	4,79
EEM1	26	26	26	0	73,45

Fonte: Software ProModel

5.4.3 - Dimensionamento do número de operadores

Para finalizar a elaboração do modelo inicial denominado Cenário “A” no *ProModel*, foram dimensionados os recursos de operação e de movimentação dos materiais no sistema. Foi adotado que os operadores movimentam os produtos no sistema e também permanecem junto às máquinas durante os processos realizados. Como há cinco (5) máquinas distintas que podem operar ao mesmo tempo, pode-se adotar um número inicial de 5 operadores.

O mesmo cenário resultante dos dimensionamentos de estoques foi simulado com 5, com 6 e com 4 operadores para obter-se dados que possam indicar qual a melhor escolha.

A primeira observação é a de que o tempo total de operação do sistema com 5 operadores foi de 27 horas e 46 minutos, aumentando em 19 minutos o tempo de 27 horas e 27 minutos obtido com 6 operadores. Esta elevação de tempo pode estar indicando que componentes possivelmente ficaram parados esperando para serem movimentados em algum local enquanto os operadores estavam dedicados aos processos em todas as máquinas. Algumas movimentações podem ter sido atrasadas por falta de recursos, comparativamente ao cenário anterior com 6 operadores.

A Tabela 16 indica o percentual de aproveitamento dos recursos utilizados com 5 operadores. A Tabela 17 mostra os mesmos resultados com o emprego de 6 operadores. A Tabela 18, com 4 operadores

Tabela 16 - Aproveitamento dos operadores com 5 pessoas.

Nome	% em uso	% deslocamento	% ocioso
operador.1	51,69	2,65	45,66
operador.2	51,65	2,82	45,53
operador.3	49,09	2,79	48,12
operador.4	44,00	2,36	53,64
operador.5	29,04	1,89	69,08
operador	45,09	2,50	52,41

Fonte: Software ProModel

Tabela 17 - Aproveitamento dos operadores com 6 pessoas.

Nome	% em uso	% deslocamento	% ocioso
operador.1	49,81	2,45	47,74
operador.2	48,35	2,54	49,11
operador.3	46,39	2,23	51,37
operador.4	40,75	2,27	56,98
operador.5	26,13	1,61	72,25
operador.6	16,87	0,90	82,22
operador	38,05	2,00	59,95

Fonte: Software ProModel

Tabela 18 - Aproveitamento dos operadores com 4 pessoas.

Nome	% em uso	% deslocamento	% ocioso
operador.1	56,70	3,00	40,30
operador.2	56,60	3,49	39,91
operador.3	54,74	3,13	42,13
operador.4	49,15	3,07	47,78
operador	54,30	3,17	42,53

Fonte: Software ProModel

Apesar do baixo percentual de utilização do operador 5, indicado na Tabela 16, a decisão de diminuir a quantidade de operadores para 4 compromete o desempenho do sistema já que as 5 máquinas podem operar simultaneamente.

Com 6 operadores (Tabela 17), apesar da baixa utilização dos operadores 5 e 6, o desempenho é melhor por haver sempre um operador disponível para movimentação enquanto os demais operam os processos junto às máquinas.

A Tabela 18 mostra o aproveitamento dos operadores quando empregados apenas 4. A ocupação dos operadores fica mais equilibrada dando a impressão de melhor aproveitamento dos recursos, porém o desempenho do sistema cai muito. Simulando-se o mesmo cenário com 4 operadores o tempo total de operação do sistema aumentou para 28 horas e 50 minutos, representando um acréscimo de 1 hora e 23 minutos.

Portanto, o cenário inicial escolhido (“*Cenário A*”) foi definido com 6 operadores e com os estoques intermediários dimensionados conforme indicado na Tabela 15. O critério para esta escolha foi baseado na indicação de tempo total consumido, e também para se ter certeza da não ocorrência de bloqueios nas máquinas do sistema por falta de recursos de movimentação ou por falta de capacidade nos estoques devido à formação de filas.

5.5 - Geração de cenários alternativos do modelo

O critério escolhido e utilizado no estudo para indicação de desempenho dos cenários alternativos é o tempo total de permanência dos componentes em processo no sistema. Os custos da operação do sistema podem ser quantificados em unidades monetárias por hora de trabalho. Portanto, quanto menor este tempo, menor o custo da operação, mais cedo as instalações estarão liberadas para novos trabalhos e menos recursos são utilizados. Considerando sempre o mesmo *output* que são todos os componentes processados, a diminuição do “*tempo total*” consumido configura ganhos em produtividade.

Ao se impor modificações ao layout inicial, podem-se esperar três tipos de ocorrências: decréscimo de tempo consumido a cada cenário indica que o layout simulado é melhor que o do cenário anterior obtido com a metodologia tradicional, acréscimo de tempo indica que o layout perdeu qualidade em relação ao anterior, e, manutenção do tempo consumido indica layouts equivalentes.

De acordo com o conceito de produtividade, o tempo de processamento das peças, ou de permanência no sistema pode ser considerado um *input*, bem como também poderiam ser consideradas as quantidades de operadores, de máquinas, de alocações para estoque, de consumo de energia, área ocupada, recursos financeiros, etc.

Na simulação de cenários alternativos, optou-se por manter inalteradas todas as variáveis do sistema, de forma a simular apenas alterações de layout, e de verificar as variações do tempo total consumido em cada cenário. Como o *input* é o denominador da fração que caracteriza a produtividade, quanto menor o tempo total consumido para a fabricação das peças, maior a produtividade, dado que o numerador, ou o *output* deste sistema, consiste sempre do mesmo lote de peças processadas em todos cenários simulados. Sabendo-se que a contagem de tempo da simulação (relógio) pára imediatamente após o

término de todos os processos de todas as entidades até sua saída do sistema, obtém-se *output* constante, portanto:

$$P = \text{output/input} \quad \rightarrow \quad P = \text{produção/tempo total} \quad \dots(17)$$

Se produção = constante

→ *Tempo total* diminui então *P* aumenta

→ *Tempo total* aumenta então *P* diminui

Onde *P* = produtividade do sistema

Portanto, se um bom projeto de layout deve ser escolhido pela sua eficácia em cumprir os objetivos pré-estabelecidos, conforme MUTHER (1978), um destes objetivos, se não o mais importante, deve ser o de se maximizar a produtividade das operações do sistema. Logo, conclui-se que o melhor layout é o que consome o menor tempo de permanência dos produtos em transformação no sistema, o seja, o de menor *input*.

Elaborou-se um novo cenário com alteração do layout denominado *Cenário “B”*, onde foram mantidos todos os demais parâmetros de processos, movimentações, recursos e estoques que foram dimensionados para o Cenário “A”.

O novo layout manteve as dimensões das estações e as condições de vizinhança, ou seja, manteve as fronteiras com as mesmas estações do layout inicial obtido com a aplicação do modelo matemático. As estações M1 e M2 foram deslocadas para baixo e para o centro formando um desenho em “U” invertido como ilustrado na Figura 20.

Os estoques de entrada (E) e de saída (S) foram posicionados segundo os mesmos critérios usados para a criação do layout inicial da Figura 11.

Os caminhos percorridos pelos operadores foram adequados à nova disposição e apresentam as seguintes dimensões: deslocamentos horizontais entre estações, 5 metros; deslocamentos verticais, 2 metros; deslocamentos diagonais, 5,38 metros. A Figura 14 mostra o layout do novo cenário. O tempo total de processamento para este cenário foi de 27 horas e 8 minutos.

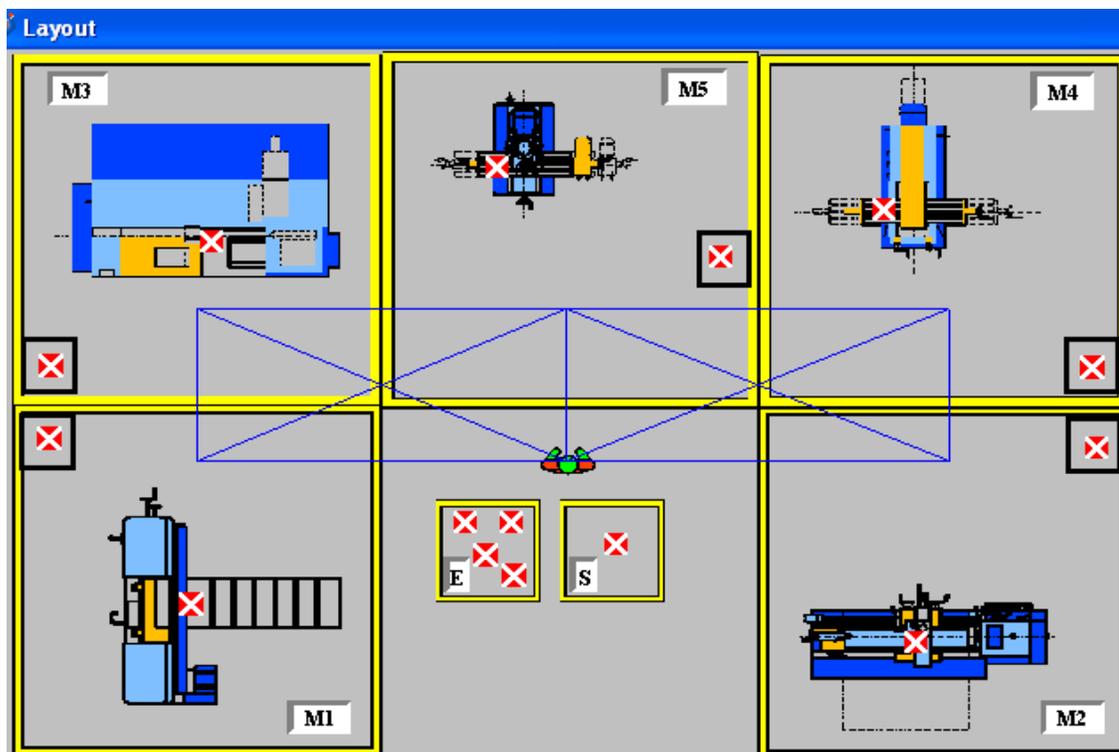


Figura 14 - Layout do Cenário "B".

Fonte: Autor

Elaborou-se um terceiro cenário com novas alterações no layout, denominado Cenário "C" onde foram novamente mantidos todos os parâmetros anteriores de processos, movimentações, recursos e estoques dimensionados para o Cenário "A". Neste novo layout foram abandonadas as formas quadradas das estações e foram retiradas suas fronteiras. Foram mantidas as vizinhanças entre as máquinas conforme o resultado do modelo matemático e também as dimensões destas em escala. Os estoques foram agrupados e procurou-se manter espaços apenas para permitir o deslocamento dos operadores entre as máquinas, como ilustrado na Figura 15.

Os caminhos readequados ao novo layout apresentam distâncias verticais de 2 metros e horizontais de 1 metro.

A simulação do Cenário "C" apresentou tempo total de processamento de 26 horas e 55 minutos.

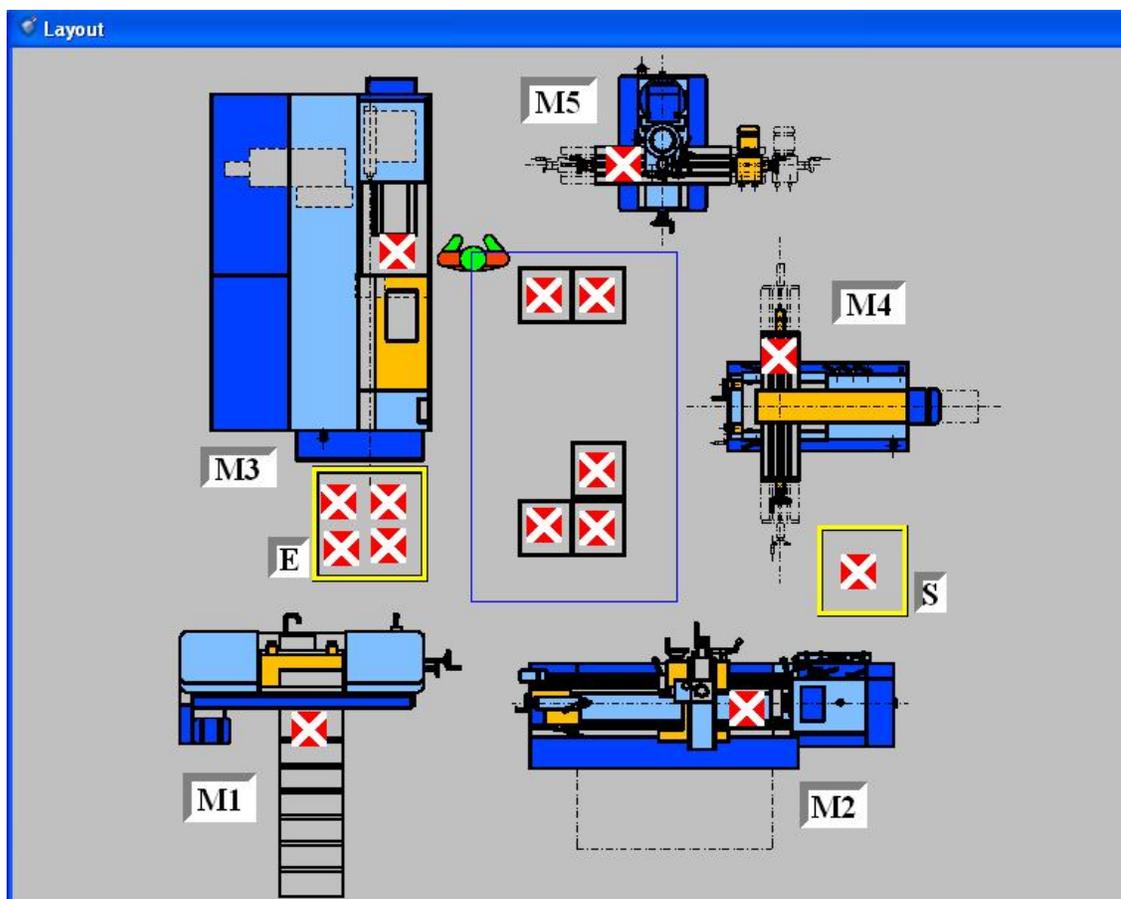


Figura 15 - Layout do Cenário “C”.

Fonte: Autor

5.6 - Análise comparativa das produtividades parciais

Através da simulação dos cenários “A”, “B” e “C” em que foram introduzidas modificações no arranjo físico em cada modelo, foram obtidos diferentes tempos totais de produção dos lotes. A cada novo layout simulado, os tempos totais (inputs) consumidos pelo sistema para a fabricação dos componentes foram reduzidos, o que se traduz em aumento da produtividade.

Para mensurar o ganho de produtividade entre os cenários, MARTINS e LAUGENI (2001) recomendam a divisão da produtividade no período mais recente pela produtividade anterior de referência. Portanto:

$$Ganho = P_j/P_i \quad \dots(18)$$

Onde: P_j = produtividade do modelo alternativo

P_i = produtividade do modelo inicial

Considerando que o *output* é constante em todos os modelos simulados, ou seja, é representado pelo conjunto de produtos processados no sistema, e a totalidade dos elementos deste conjunto foi integralmente processada em todos os cenários, tem-se:

$$Ganho = (C/T_j)/(C/T_i) \quad \dots(19)$$

Onde: C = constante = *output*

T_j = tempo consumido no modelo alternativo

T_i = tempo consumido no modelo inicial

$$\rightarrow Ganho = (C/T_j)*(T_i/C) \quad \dots(20)$$

$$\rightarrow Ganho = T_i/T_j \quad \dots(21)$$

$$\rightarrow Ganho\% = ((T_i/T_j)-1)*100\% \quad \dots(22)$$

Logo, o ganho de produtividade relativo ao *input* tempo pode ser calculado dividindo-se o tempo obtido no modelo inicial (*Cenário "A"*), pelo tempo obtido na simulação do cenário alternativo. Os tempos obtidos pelos modelos, bem como os ganhos em produtividade em cada cenário estão apresentados na Tabela 19 que segue.

Tabela 19 - Tempos consumidos e ganhos de produtividade.

Cenário	Tempo Total (h.m.)	Tempo Total (horas)	ganho produtividade	ganho %
A	27:27	27,46	1	0,00
B	27:09	27,15	1,011418048	1,14
C	26:55	26,92	1,020059435	2,01

Fonte: Autor.

Portanto, a simulação dos cenários contendo os layouts alternativos do sistema estudado foi capaz de indicar ganhos de produtividade de até 2,01%. Para efeito de comparação do desempenho dos cenários alternativos, o layout adotado no cenário "C" foi o melhor por consumir o menor tempo entre todos os cenários.

Outro aspecto importante em projeto de layout é a área total ocupada pelo sistema. A simples observação de cada layout em cada cenário alternativo fornece parâmetros para escolha, considerando-se a produtividade parcial medida através da área ocupada.

A Tabela 20 que segue mostra as áreas ocupadas na planta de cada cenário e os ganhos de produtividade parcial em relação a este *input*. Supondo-se que, após o dimensionamento das capacidades dos estoques de entrada E, e o de saída S no cenário “A”, estes ocupem uma área igual à de uma estação de 5 x 5 metros (25m²), a área total ocupada pelo sistema na planta seria de 6 x 25 = 150m². O cenário “B”, ocuparia uma área igual de 150m². O cenário “C”, em que foram quebradas as fronteiras que delimitavam as estações de trabalho, apresenta uma área total de aproximadamente 75m², medida em escala com auxílio do AutoCAD.

Tabela 20 - Área ocupada na planta e ganhos de produtividade.

Cenário	Área Total (m ²)	ganho produtividade	ganho %
A	150	1	0,00
B	150	1	0,00
C	75	2	100,00

Fonte: Autor.

Portanto, a simulação do layout do cenário “C” foi capaz de apontar ganho de 100% em produtividade parcial considerando-se apenas a área total ocupada pelo sistema.

De posse destes dados pode-se verificar qual ganho de produtividade parcial representa maior redução de custos da operação, e a composição destes ganhos é que determina a escolha do melhor cenário. Para o caso do sistema estudado, os ganhos apresentados para as duas produtividades parciais medidas na simulação indicam que o layout do cenário “C” é o de melhor desempenho, portanto, um forte candidato à implementação.

5.7 - Outros parâmetros de decisão

A simulação de diferentes cenários pode ser entendida como um veículo de teste para decisões quaisquer, fundamentadas ou empíricas. Com o modelo pronto é possível impor modificações em variáveis e verificar o comportamento do sistema quando sujeito a estas modificações.

Se um dos objetivos do projeto de layout fosse, por exemplo, o de dimensionar os estoques intermediários ao mínimo, por representarem custos adicionais ou por ocuparem demasiado espaço na planta, seria conveniente simular diferentes cenários e analisar o

desempenho de cada um mantendo as capacidades dos estoques em um valor mínimo, mas que possibilite o funcionamento do sistema.

Esta análise já foi feita na elaboração do primeiro cenário, onde os estoques intermediários foram dimensionados com 26 unidades de capacidade para todas as estações. Este foi o valor mínimo simulado que permitiu ao sistema processar todos os componentes sem travar, mesmo com todas as máquinas apresentando algum percentual de bloqueio (Tabela 7 pág. 73).

Isto significa que as máquinas permanecem bloqueadas por algum tempo esperando uma vaga na estação seguinte, seja no estoque de entrada ou na máquina. Ao baixar a ocupação máxima do estoque de entrada da estação seguinte, imediatamente o operador retira o componente da máquina bloqueada e o envia, liberando o equipamento para entrada de outro componente.

Portanto, é possível simular novos cenários mantendo-se a capacidade de 26 unidades para cada estoque de entrada das estações. Isto feito, foram mantidos os layouts e demais variáveis dos Cenários “A”, “B”, e “C”, porém com as capacidades diminuídas para 26 unidades. Estes novos cenários foram denominados respectivamente “AA”, “BB”, e “CC”. A Tabela 21 mostra os novos tempos totais de processamento no sistema e os possíveis ganhos de produtividade com esta configuração.

Tabela 21 - Tempos consumidos e ganhos de produtividade com estoques reduzidos para 26 unidades.

Cenário	Tempo Total (h.m.)	Tempo Total (horas)	ganho produtividade	ganho %
AA	27:31	27,53	1	0,00
BB	27:09	27,15	1,013996317	1,40
CC	27:01	27,02	1,018874907	1,89

Fonte: Autor

Tabela 22 - Tempos consumidos e ganhos de produtividade para todos cenários.

Cenário	Tempo Total (h.m.)	Tempo Total (horas)	ganho produtividade	ganho %
AA	27:31	27,53	1	0,00
A	27:27	27,46	1,002549162	0,25
BB	27:09	27,15	1,013996317	1,40
B	27:09	27,15	1,013996317	1,40
CC	27:01	27,02	1,018874907	1,89
C	26:55	26,92	1,022659733	2,27

Fonte: Autor

A Tabela 22 mostra os tempos consumidos e ganhos de produtividade para todos os cenários simulados. Os resultados apontam que os layouts dos cenários “B” e “BB” apresentam o mesmo desempenho em termos de tempo consumido.

Para efeito de tomada de decisão, o cenário “BB” pode ser considerado melhor que o cenário “B” por apresentar estoques intermediários muito menores, ocupando menor espaço no layout, além de terem capacidades iguais, o que possibilita a padronização dos espaços ocupados por estes estoques, característica que também melhora o layout da planta.

A Tabela 23 que segue apresenta a ocupação dos estoques intermediários nos diferentes cenários simulados.

Tabela 23 - Ocupação máxima dos estoques intermediários.

Cenários	A	B	C	AA, BB, CC
Nome	conteudo máx.	conteudo máx.	conteudo máx.	conteudo máx.
EEM3	79	79	79	26
EEM5	93	98	100	26
EEM4	94	99	103	26
EEM2	18	19	20	26
EEM1	26	26	26	26
Soma	310	321	328	130

Fonte: Software ProModel

A simulação também fornece parâmetros para decisão em eventuais ampliações de capacidades com aumento da quantidade de máquinas específicas. O percentual em operação mostrado na Tabela 7 da pág. 73 mostra claramente eventuais gargalos na produção. No caso do estudo, a máquina M4 fresadora apresentou 80,71% do tempo em operação. Pode-se simular novos cenários sem alterar outras variáveis com duas (2) ou mais unidades de cada máquina e verificar os ganhos de produtividade obtidos. Isto não foi feito neste estudo porque foge dos objetivos estabelecidos.

Em sistemas que se utilizam de operadores para efetuar a movimentação, como no caso do estudo, o custo de movimentação não depende apenas do deslocamento de materiais. Neste estudo não foram considerados operadores com a tarefa única de movimentar os componentes, mas poderia ser feito em novos cenários alternativos. De qualquer maneira, mesmo não sendo utilizado integralmente, o recurso de movimentação deve estar sempre disponível, e em se tratando de operadores, o custo parado ou em movimento é o mesmo.

A simulação permite quantificar os recursos utilizados, como foi mostrado no dimensionamento da quantidade de operadores. Este parâmetro fornece dados para um cálculo mais preciso dos custos de movimentação do sistema.

5.8 - Discussão dos resultados obtidos

Intuitivamente, já seriam esperadas melhoras de desempenho entre os layouts alternativos simulados, porém seria de grande dificuldade mensurar estes ganhos de produtividade sem o sistema real estar implementado. Este sistema fictício de manufatura apresenta comportamentos de fila que influem diretamente no layout. A primeira simulação do cenário inicial “A” parou sem terminar o processamento todos os produtos, em um tempo indicado de 6 horas e 15 minutos por insuficiência de estoques intermediários.

Fica evidente que em sistemas desbalanceados, os componentes não são atendidos pelos processos imediatamente, impondo algum tipo de acúmulo anterior para espera pela desocupação da máquina utilizada. Além disso, os tempos de processo podem sofrer variações segundo algum comportamento estocástico. A complexidade aumenta ainda mais nos sistemas em que cada máquina processa diferentes produtos com diferentes tempos de processo e, ainda ocorrem fluxos cruzados entre estações.

Em um instante qualquer, um componente qualquer entra na estação, proveniente do estoque de entrada ou de outra estação que já tenha concluído algum processo. Ao chegar ele pode encontrar a máquina desocupada e entrar para o processamento imediatamente, ou pode encontrar a máquina ocupada por outro componente em processo. Neste caso o componente é direcionado a outro local, no estudo, o estoque de entrada da estação. Se o estoque não existe o componente permanece ocupando a máquina anterior travando o sistema. Esta lógica permite determinar a necessidade de estoques, e a análise dos bloqueios de cada máquina permite dimensionar os estoques intermediários.

É importante notar que este redirecionamento altera o fluxo inicial projetado dos componentes. Ao chegar à estação existem duas alternativas de rotas e podem ocorrer duas movimentações distintas, ou uma ou outra, para cada um dos componentes processados, como ilustrado na Figura 16.

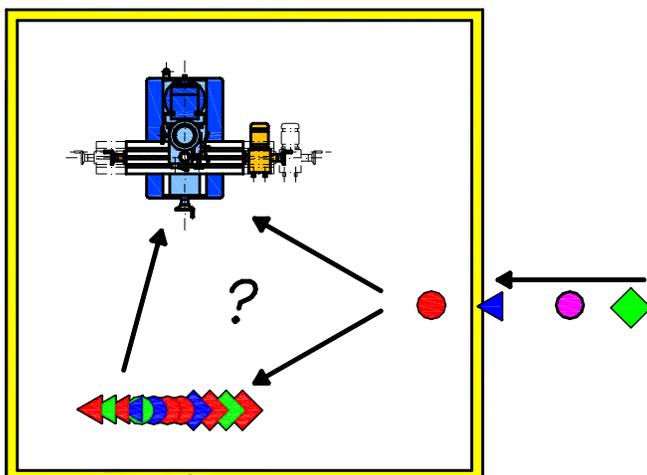


Figura 16 - Estação de trabalho, rotas alternativas.

Fonte: Autor.

A maioria das técnicas utilizadas em projeto de layout utiliza o estudo dos fluxos de materiais na planta como base de dados inicial que fornece insumos para quantificar as interações entre os diversos locais que serão posicionados na planta. Com a utilização de estoques que abrigam filas de produtos e também de roteamentos alternativos para estes produtos, o estudo do fluxo dos materiais fica comprometido e impreciso.

Outra dificuldade é a de prever quantos e quais componentes processados no sistema seriam dirigidos diretamente para cada máquina ou para o estoque intermediário (Figura 16).

Portanto, todo o procedimento de modelagem, desde o levantamento de fluxos entre estações, a elaboração da carta de/para, o diagrama de intensidade de movimentação, e o modelo matemático, pode estar incorreto, ou no mínimo é impreciso. O modelo deveria incorporar as informações de fluxo considerando as movimentações para os estoques e quantificando-as.

Isto justifica a afirmação de diversos autores que recomendam que seja feita a modelagem matemática para gerar uma solução inicial que deve ser melhorada com o estudo das filas e simulação.

O modelo matemático fornece apenas uma indicação de um layout inicial que serve como um primeiro cenário para aprimoramento através da simulação. A simulação por sua vez, incorpora e imita os comportamentos de filas que ocorrem nos estoques intermediários. Além disso, fornece subsídios que orientam o dimensionamento dos estoques.

A simulação usada como complemento ao projeto de layout pode ser entendida como uma ferramenta de escolha e de auxílio à decisão por simular layouts alternativos com rapidez, mas também pode ser utilizada como uma parte de um ciclo de aprimoramentos.

HILLIER e LIEBERMAN (2006) e HERAGU (2006) afirmam que a modelagem matemática é a melhor e mais precisa técnica para projetos de layout. Como se constatou neste estudo, para sistemas desbalanceados a modelagem não incorpora variáveis importantes tais como a ocorrência de bloqueios, a necessidade de estoques intermediários (filas) e suas capacidades, o fluxo real de componentes entre rotas alternativas, as dimensões ocupadas pelos estoques na planta, etc. Isto ocorre porque não são considerados os tempos distintos de processamento.

O ideal talvez seja utilizar a simulação como parte de um ciclo. As informações de estoques e de fluxos adquiridas através da simulação poderiam ser incorporadas na elaboração de um novo modelo, de cujo resultado seria uma solução ainda mais aprimorada, e, de posse desta solução, realizar nova simulação até que não seja possível obter resultados melhores que os do ciclo anterior.

6 - CONCLUSÕES

O simples layout, ou a alocação das estações de trabalho na planta em determinadas posições relativas entre si, bem como as distâncias entre os locais, exercem influência na produtividade de sistemas, como foi verificado comparando-se os ganhos de produtividade a cada cenário simulado contendo um layout alternativo em que foram mantidos sem alterações todos os demais parâmetros e variáveis.

O estudo deixa evidente que a decisão de não se alocar estoques entre estações de trabalho é inviável para sistemas desbalanceados. Nestes sistemas os componentes não são atendidos pelos processos imediatamente, impondo algum tipo de acúmulo anterior para espera pela desocupação da máquina utilizada. A simulação, através da sua lógica de processamento, permite verificar se há necessidade de estoques intermediários e também fornece informações de bloqueio que orientam o seu dimensionamento.

Como foi verificado no estudo, em sistemas desbalanceados ocorre ociosidade dos equipamentos utilizados. A simulação do sistema permite obter informações de uso efetivo das máquinas fornecendo indicadores de utilização para cada uma em porcentagem ou em horas. Através da simulação, é possível aumentar a quantidade de máquinas com grande ocupação em cada estação para realizar o mesmo processo gerando cenários alternativos. Estes cenários simulados fornecem diferentes indicadores de desempenho que podem ser comparados indicando ganhos, ou perdas de produtividade. Mesmo que se obtenham ganhos de desempenho é necessário analisar se estes superam os custos de investimento antes de se tomar uma decisão.

A abordagem tradicional para projeto de layout, neste estudo referenciada na obra de SLACK et al (2002), não considera os tempos de processo consumidos no sistema de manufatura. Como verificado neste estudo, nestes sistemas são necessários estoques intermediários. Outra característica é a ocorrência de ociosidade dos equipamentos utilizados. Quantificar os recursos de movimentação e de operação utilizados sem considerar os comportamentos de intrincadas filas que ocorrem no sistema, bem como das movimentações adicionais impostas pela necessidade de estoques intermediários pode incorrer em erro ou gerar imprecisão. A simulação incorpora e imita os comportamentos de sistemas filas que ocorrem no sistema desbalanceado, de modo a gerar informações mais precisas sobre aproveitamento dos recursos operacionais e os de movimentação. Novamente, indicadores de

desempenho fornecidos a cada simulação de cenários alternativos, bem como a análise do aproveitamento dos recursos envolvidos, permitem dimensionar os recursos utilizados.

A simulação foi eficiente e flexível, em termos de incorporar todas as variáveis importantes para o projeto de layout de sistemas tais como, sequências de processos, tempos de processamento, necessidade de estoques intermediários, capacidade dos estoques, políticas de planejamento, entre outras, e permitir simular rapidamente cenários alternativos com modificações nestas variáveis. A simulação retorna informações que, devidamente analisadas, orientam sucessivas modificações de parâmetros. A qualidade destas modificações pode ser avaliada através das indicações de desempenho do sistema simulado. Isto é feito de forma amigável e rápida, permitindo que diversas escolhas de combinações de variáveis sejam testadas rapidamente.

A simulação mostrou-se capaz de auxiliar o projeto de layout. Apesar de ser uma técnica não otimizante, mesmo partindo-se de um layout inicial obtido com a utilização de técnicas e conceitos largamente utilizados em layout, a simulação forneceu subsídios para avaliar alternativas ainda melhores do que a solução inicial que serviu para elaborar o primeiro cenário simulado. O critério de comparações de desempenho do sistema foi suficiente para indicar ganhos em produtividade em cenários com layouts alternativos, e, estas informações configuram importante base de dados para a tomada de decisões.

REFERÊNCIA BIBLIOGRAFICA

- DEB, S. K.; BHATTACHARYYA, B. Fuzzy Decision Support System for Manufacturing Facilities Layout Planning. **Decision Support Systems**, v. 40, p. 305-314, 2005.
- DRIRA, A.; PIERREVAL, H.; HAJRI-GABOUJ, S. Facility Layout Problems: A Survey. **Annual Reviews in Control**, v. 31, p. 255-267, 2007.
- DWEIRI, F. Fuzzy Development of Crisp Activity Relationship Charts for Facilities Layout. **Computers & Industrial Engineering**, v. 36, p. 1-16, 1999.
- DWEIRI, F.; MEIER, F. A. Application of Fuzzy Decision-Making in Facilities Layout Planning. **International Journal of Production Research**, v. 34, n. 11, p. 3207-3225, 1996.
- GAREY, M. R.; JOHNSON, D. S. **Computers and Intractability: A Guide to the Theory of NP-Completeness**. New York: W. H. Freeman, 1979.
- HARREL, C.; GHOSH, B. K.; BOWDEN, R. O. **Simulation Using ProModel**, 2. ed. New York: McGraw-Hill, 2004.
- HERAGU, S. S. **Facilities Design**, 2. ed. U.S.A.: iUniverse, 2006.
- HILLIER, F. S.; LIEBERMAN, G. J. **Introdução à Pesquisa Operacional**. 8. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 2006.
- MARTINS, P. G. e LAUGENI, F. P. **Administração da Produção**, São Paulo: Saraiva, 2001.
- MIGUEL, Paulo A. C. Estudo de caso na engenharia de produção: estruturação e recomendações para sua condução. **Produção**, v. 17, n. 1, p. 216-229, 2007.
- MUTHER, Richard. **Planejamento do Layout: sistema SLP**, São Paulo: Edgard Blücher, 1978.
- PIDD, M. **Computer Simulation in Management Science**, 5. ed. England: John Wiley & Sons, 2004.
- SAMPIERI, R. H.; COLLADO, C. H.; LUCIO, P. B. **Metodologia de Pesquisa**, 3. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 2006.
- SLACK, N.; LEWIS, M. **Operations Strategy**, New Jersey: Pearson Education, 2003.
- SLACK, N.; CHAMBERS, S.; JOHNSTON, R. **Administração da Produção**, 2. ed. São Paulo: Atlas, 2002.
- TOMPKINS, J. A.; WHITE, J. A.; BOZER, Y. A.; TANCHOCO, J. M. A. **Facilities Planning**, 3. ed. U.S.A.: John Wiley & Sons, 2003.
- ZANDIN, K. B. **MOST – Work Measurement Systems**, 3. ed. New York: Marcel Dekker, 2003.

BIBLIOGRAFIA ADICIONAL

ABDI, M. R.; LABIB, A. W. Grouping and Selecting Products: the Design Key of Reconfigurable Manufacturing Systems (RMSs). **International Journal of Production Research**, v. 42, n. 3, p. 521-546, 2004.

ALVARENGA, A. G. de; NEGREIROS, F. J.; MESTRIA, M. Metaheuristic Methods for a Class of the Facility Layout Problem. **Journal of Intelligent Manufacturing ABI/INFORM**, v. 11, n. 4, p. 421-430, 2000.

AMARAL, A. R. S.; On the Exact Solution of a Facility Layout Problem. **European Journal of Operational Research**, v. 173, p. 508-518, 2006.

ANJOS, M. F.; VANNELLI, A. A New Mathematical-Programming Framework for Facility-Layout Design. **Inform Journal of Computing**, v. 18, n. 1, p. 111-118, 2006.

ASEF-VAZIRI, A.; LAPORTE, G. Loop Based Facility Planning and Material Handling. **European Journal of Operational Research**, v. 164, p. 1-11, 2005.

BALAMURUGAN, K.; SELLADURAI, V.; ILAMATHI, B. Design and Optimization of Manufacturing Facilities Layouts. **Journal Engineering Manufacture**, v. 220, p. 1249-1257, 2006.

BENJAAFAR, S. Modeling and Analysis of Congestion in the Design of Facility Layouts. **Management Science ABI/INFORM**, v. 48, n. 5, p. 679-704, 2002.

BENJAAFAR, S.; HERAGU, S. S.; IRANI, S. A. Next Generation Factory Layouts: Research Challenges and Recent Progress. **Interfaces ABI/INFORM**, v. 32, n. 6, p. 58-76, 2002.

BOCK, S.; HOBERG, K. Detailed Layout Planning for Irregularly-Shaped Machines with Transportation Path Design. **European Journal of Operational Research**, v. 177, p. 693-718, 2007.

BORBA, Mirna de. **Arranjo Físico** – apostila, Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 1998.

BOUCHÉ, C.; LEITNER, A.; SASS, F. **Dubbel – Manual da Construção de Máquinas**, 13. ed. São Paulo: Hemus, 1974.

BOWERSOX, D. J.; CLOSS, D. J.; COOPER, M. B. **Gestão Logística de Cadeias de Suprimentos**, Porto Alegre: Bookman, 2006.

BRAGLIA, M.; ZANONI, S.; ZAVANELLA, L. Layout Design in Dynamic Environments: Analytical Issues. **International Transactions in Operational Research**, v. 12, p. 1-19, 2005.

BRAGLIA, M.; ZANONI, S.; ZAVANELLA, L. Robust Versus Stable Layout in Stochastic Environments. **Production Planning & Control**, v. 16, n. 1, p. 71-80, 2005.

BRANDÃO, Ignácio de Loyola. **Oficina de Sonhos Américo Emílio Romi**, São Paulo: DBA Artes Gráficas, 1996.

CASTILLO, I.; SIM; T. A Spring-Embedding Approach for the Facility Layout Problem. **Journal of the Operational Research Society**, v. 55, p. 73-81, 2004.

CASTILLO, I.; WESTERLUND, T. An ϵ -Accurate Model for Optimal Unequal-Area Block Layout Design. **Computers & Operations Research**, v. 32, p. 429-447, 2005.

CHAE, J.; PETERS, B. A.; A Simulated Annealing Algorithm Based on a Closed Loop Layout for Facility Layout Design in Flexible Manufacturing Systems. **International Journal of Production Research**, v. 44, n. 13, p. 2561-2572, 2006.

CHEN, C.-W.; SHA, D. Y. Heuristic Approach for Solving the Multi-Objective Facility Layout Problem. **International Journal of Production Research**, v. 43, n. 21, p. 4493-4507, 2005.

CHIANG, W.-C.; KOUVELIS, P.; URBAN, T. L. Single- and Multi-Objective Facility Layout with Workflow Interference Considerations. **European Journal of Operational Research**, v. 174, p. 1414-1426, 2006.

CHIEN, Te-King. An Empirical Study of Facility Layout Using a Modified SLP Procedure. **Journal of Manufacturing Technology Management**, v. 15, n. 6, p. 455-465, 2004.

CHWIF, L.; BARRETO, M. R. P.; MOSCATO, L. A. A Solution to the Facility Layout Problem Using Simulated Annealing. **Computers in Industry**, v. 36, p. 125-132, 1998.

CIMIKOWSKI, R.; MOONEY, E. Proximity-Based Adjacency Determination for Facility Layout. **Computers & Industrial Engineering**, Great Britain, v. 32, n. 2, p. 341-349, 1997.

DEL RÍO-CIDONCHA, G.; MARTÍNEZ-PALACIOS, J.; IGLESIAS, J. E. A Multidisciplinary Model for Floorplan Design. **International Journal of Production Research**, v. 45, n. 15, p. 3457-3476, 2007.

DJASSEMI, M. Improving Factory Layout Under a Mixed Floor and Overhead Material Handling Condition. **Journal of Manufacturing Technology Management**, v. 18, n. 3, p. 281-291, 2007.

EL-BAZ, M. A. A Genetic Algorithm for Facility Layout Problems of Different Manufacturing Environments. **Computers & Industrial Engineering**, v. 47, p. 233-246, 2004.

ENEA, M.; GALANTE, G.; PANASCIA, E. The Facility Layout Problem Approached Using a Fuzzy Model and a Genetic Search. **Journal of Intelligent Manufacturing**, v. 16, p. 303-316, 2005.

ERTAY, T.; RUAN, D.; TUZKAYA, U. R. Integrating Data Envelopment Analysis and Analytic Hierarchy for the Facility Layout Design in Manufacturing Systems. **Information Sciences**, v. 176, p. 237-262, 2006.

GIFFIN, J. W.; FOULDS, L. R.; CAMERON, D. C. Drawing a Block Plan From a Rel Chart With Graph Theory and Microcomputer. **Computers & Industrial Engineering**, Great Britain, v. 10, n. 2, p. 109-116, 1986.

GOETSCHALCKX, M. An Interactive Layout Heuristic Based on Hexagonal Adjacency Graphs. **European Journal of Operational Research**, v. 63, p. 304-321, 1992.

GOPALAKRISHNAN, B.; TURUVEKERE, R; GUPTA, D.P. Computer Integrated Facilities Planning and Design. **Facilities ABI/INFORM**, v.22, n. 7-8, p. 199-209, 2004.

GOPALAKRISHNAN, B.; WENG, L.; GUPTA, D. P. Facilities Design Using a Split Departmental Layout Configuration. **Facilities ABI/INFORM**, v. 21, n. 3-4, p. 66-73, 2003.

HASSAN, M. M. D. Layout Design in Group Technology Manufacturing. **International Journal of Production Economics**, v. 38, p. 173-188, 1995.

HASSAN, M. M. D. Toward Guiding the Selection of a Layout Procedure. **Journal of Manufacturing Technology Management**, v. 18, n. 3, p. 292-303, 2007.

HENDERSON, S. G.; NELSON, B. L. **Handbooks in Operations Research and Management Science, Volume 13, Simulation**, Amsterdam: North-Holland / Elsevier, 2006.

HICKS, C. A Genetic Algorithm Tool for Designing Manufacturing Facilities in the Capital Goods Industry. **International Journal of Production Economics**, v. 90, p. 199-211, 2004.

HICKS, C. A Genetic Algorithm Tool for Optimizing Cellular or Functional Layouts in the Capital Goods Industry. **International Journal of Production Economics**, v. 104, p. 598-614, 2006.

IIDA, I. **Ergonomia Projeto e Produção**, 7. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2001.

KIM, J.-G.; KIM, Y.-D. Layout Planning for Facilities with Fixed Shapes and Input and Output Points. **International Journal of Production Research**, v. 38, n. 18, p. 4635-4653, 2000.

KULTUREL-KONAK, S. Approaches to Uncertainties in Facility Layout Problems: Perspectives at the Beginning of the 21^o Century. **Journal Intelligent Manufacturing**, v. 18, p. 273-284, 2007.

KULTUREL-KONAK, S.; SMITH, A. E.; NORMAN, B. A. **International Journal of Production Research**, v. 42, n. 21, p. 4475-4493, 2004.

KUO, Y.; YANG, T.; HUANG, G.-W. The Use of Grey Relational Analysis in Solving Multiple Attribute Decision-Making Problems. **Computers & Industrial Engineering**, v. 55, p. 80-93, 2008.

LAM, K.-C.; NING, X.; NG, T. The Application of the Ant Colony Optimization Algorithm to the Construction Site Layout Planning Problem. **Construction Management and Economics**, v. 25, p. 359-374, 2007.

- LAM, K.-C.; TANG, C. M.; LEE, W. C. Application of the Entropy Technique and Genetic Algorithms to Construction Site Layout Planning of Medium-Size Projects. **Construction Management and Economics**, v. 23, p. 127-145, 2005.
- LEE, Y. H.; LEE, M. H. A Shape-Based Block Layout Approach to Facility Layout Problems Using Hybrid Genetic Algorithm. **Computers & Industrial Engineering**, v. 42, p. 237-248, 2002.
- LEE, G.-C.; KIM, Y.-D. Algorithms for Adjusting Shapes of Departments in Block Layouts on the Grid-Based Plane. **Omega**, v. 28, p. 111-122, 2000.
- LEUNG, J. A New Graph-Theoretic Heuristic for Facility Layout. **Management Science ABI/INFORM**, v. 38, n. 4, p. 594-605, 1992.
- LIN, L. C.; SHARP, G. P. Quantitative and Qualitative Indices for the Plant Layout Evaluation Problem. **European Journal of Operational Research**, v. 116, p. 100-117, 1999.
- LOGENDRAN, R.; KRIAUSAKUL, T.; A Methodology for Solving the Unequal Area Facility Layout Problem Using Distance and Shape-Based Measures. **International Journal of Production Research**, v. 44, n. 7, p. 1243-1272, 2006.
- MELLER, R. D.; GAU, K.-Y. The Facility Layout Problem: Recent and Emerging Trends and Perspectives. **Journal of Manufacturing Systems ABI/INFORM**, v. 15, n. 5, p. 351-366, 1996.
- MELLER, R. D.; NARAYANAN, V.; VANCE, P. H. Optimal Facility Layout Design. **Operations Research Letters**, v. 23, p. 117-127, 1999.
- MOBLEY, R. K. **Plant Engineer's Handbook**, U.S.A.: Butterworth-Heinemann / Elsevier, 2001.
- MONTREUIL, B.; RATLIFF, H. D. Utilizing Cut Trees as Design Skeletons for Facility Layout. **IIE Transactions**, v. 21, n. 2, p. 136-143, 1989.
- MONTREUIL, B.; VENKATADRI, U. Strategic Interpolative Design of Dynamic Manufacturing Systems Layouts. **Management Science ABI/INFORM**, v. 36, n. 6, p. 682-694, 1991.
- PIERREVAL, H.; CAUX, C.; PARIS, J. L.; VIGUIER, F. Evolutionary Approaches to the Design and Organization of Manufacturing Systems. **Computers & Industrial Engineering**, v. 44, p. 339-364, 2003.
- PUCCINI, A. L.; PIZZOLATO, N. D. **Programação Linear**, 2. Ed. Rio de Janeiro: LTC, 1990.
- RAWABDEH, I.; TAHBOUD, K. A New Heuristic Approach for a Computer-Aided Facility Layout. **Journal of Manufacturing Technology Management**, v. 17, n. 7, p. 962-986, 2006.
- ROSENBLATT, M. J.; GOLANY, B. A Distance Assignment Approach to the Facility Layout Problem. **European Journal of Operational Research**, v. 57, p. 253-270, 1992.

- ROSS, Timothy J. **Fuzzy Logic with Engineering Applications**, 2. ed. New York: John Wiley & Sons, 2004.
- SAMPIERI, R. H.; COLLADO, C. H.; LUCIO, P. B. **Metodologia de Pesquisa**, 3. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 2006.
- SARIN, S. C.; LOHARJUN, P.; MALMBORG, C. J.; KRISHNAKUMAR, B. A Multiattribute Decision-Theoretic Approach for the Layout Design Problem. **European Journal of Operational Research**, v. 57, p. 231-242, 1992.
- SHAYAN, E.; CHITILAPPILLY, A. Genetic Algorithm for Facilities Layout Problems Based on Slicing Tree Structure. **International Journal of Production Research**, v. 42, n. 19, p. 4055-4067, 2004.
- SIRINAOVAKUL, B.; LIMUDOMSUK, T. Maximum Weight Matching and Genetic Algorithm for Fixed-Shape Facility Layout Problem. **International Journal of Production Research**, v. 45, n. 12, p. 2655-2672, 2007.
- SMITH, J. MG. Dilemmas in Factory Design: Paradox and Paradigm. **OR Spectrum**, v. 27, p. 171-193, 2005.
- TAM, K. Y. Genetic Algorithms, Function Optimization, and Facility Layout Design. **European Journal of Operational Research**, v. 63, p. 322-346, 1992.
- TSOUKALAS, L. H.; UHRIG, R.E. **Fuzzy and Neural Approaches in Engineering**. New York: John Wiley & Sons, 1997.
- TSUCHIYA, K.; BHARITKAR, S.; TAKEFUJI, Y. A Neural Network Approach to Facility Layout Problems. **European Journal of Operational Research**, v. 89, p. 556-563, 1996.
- URBAN, T. L. Combining Quantitative and Qualitative Analyses in Facility Layout. **Production and Inventory Management Journal**, v. 30, n. 3, p. 73-77, 1989.
- VAN CAMP, D. J.; CARTER, M. W.; VANNELLI, A. A Nonlinear Optimization Approach for Solving Facility Layout Problems. **European Journal of Operational Research**, v. 57, p. 174-189, 1991.
- WANG, M.-J.; HU, M. H.; KU, M.-Y. A Solution to the Unequal Area Facilities Layout Problem by Genetic Algorithm. **Computers in Industry ABI/INFORM**, v. 56, p. 207-220, 2005.
- YAMAN, R. Establishment and Use of Virtual Layouts for Manufacturing. **Integrated Manufacturing Systems ABI/INFORM**, v. 12, n. 6-7, p. 400-408, 2001.
- YANG, T.; HUNG, C.-C. Multiple-Attribute Decision Making Methods for Plant Layout Design Problem. **Robotics and Computer-Integrated Manufacturing**, v. 23, p. 126-137, 2007.
- YANG, T; KUO, C. A Hierarchical AHP/DEA Methodology for the Facilities Layout Design Problem. **European Journal of Operational Research**, v. 147, p. 128-136, 2003.

YE, M.; ZHOU, G. A Local Genetic Approach to Multi-Objective, Facility Layout Problems With Fixed Aisles. **International Journal of Production Research**, v. 45, n. 22, p. 5243-5264, 2007.

ZHAO, T.; TSENG, C.-L. Flexible Facility Interior Layout: a Real Options Approach. **Journal of the Operational Research Society**, v. 58, p. 729-739, 2007.

APÊNDICE

Modelo implementado no software ProModel relativo ao Cenário A

```

*****
*
*   C:\documente and Settings\Bruno Biazere\Meus documentos\Master Pro\Bibliografias\Layout\PREPARAÇÃO\cenario A.Mob *
*
*****

```

```

Tempo:          Minutos
Distância:      Metros

```

```

*****
*
*   locais
*
*****

```

Nome	Cap	Unidade	Estatísticas	Regras	Custo
M1_terra	1	l	Série de Tempo	O Mais Velho,	
M2_torno_mechalico	1	l	Série de Tempo	O Mais Velho,	
M3_torno_ond	1	l	Série de Tempo	O Mais Velho,	
M4_frenadora	1	l	Série de Tempo	O Mais Velho,	
M5_furadeira	1	l	Série de Tempo	O Mais Velho,	
E_entrada	400	l	Série de Tempo	O Mais Velho,	
S_saida	5	l	Série de Tempo	O Mais Velho,	
E0N3	80	l	Série de Tempo	O Mais Velho,	
E0N5	105	l	Série de Tempo	O Mais Velho,	
E0M4	105	l	Série de Tempo	O Mais Velho,	
E0M2	25	l	Série de Tempo	O Mais Velho,	
E0M1	26	l	Série de Tempo	O Mais Velho,	


```

THEN P28
P3_flange
P3_flange
P3_flange
THEN P29
P3_flange
P4_placa
E_entrada
THEN P30
P4_placa
P4_placa
M4_fresadora
WAIT 3,75
THEN P31
P4_placa
P4_placa
P4_placa
E_entrada
THEN P32
P4_placa
P4_placa
M4_fresadora
WAIT 3,75
THEN P33
P4_placa
P4_placa
E_entrada
WAIT 3
THEN P34
P4_placa
P4_placa
M4_fresadora
WAIT 3
THEN P35
P4_placa
P4_placa
E_entrada
M4_fresadora
WAIT 6
THEN P36
P5_caixa
P5_caixa
P5_caixa
M5_torno_mecanico
WAIT 9
THEN P37
P5_caixa
P5_caixa
P5_caixa
M5_furadeira
WAIT 3,75
THEN P38
P5_caixa
P5_caixa
E_saida
WAIT 3

```

THEN PXX	ACTIVATION	OPERATION	MODE	OPERATION
P3_flange	1	P3_flange	EM5	MOVE WITH OPERATOR
P3_flange	1	P3_flange	M5_furadeira	FIRST 1 MOVE WITH OPERATOR
P3_flange	1	P3_flange	S_saida	FIRST 1 MOVE WITH OPERATOR
P4_placa	1	P3_flange	EXIT	FIRST 1
P4_placa	1	P4_placa	M4_fresadora	FIRST 1 MOVE WITH OPERATOR
P4_placa	1	P4_placa	EM4	FIRST 1 MOVE WITH OPERATOR
P4_placa	1	P4_placa	M4_fresadora	FIRST 1 MOVE WITH OPERATOR
P4_placa	1	P4_placa	M5_furadeira	FIRST 1 MOVE WITH OPERATOR
P4_placa	1	P4_placa	EM5	FIRST 1 MOVE WITH OPERATOR
P4_placa	1	P4_placa	M5_furadeira	FIRST 1 MOVE WITH OPERATOR
P4_placa	1	P4_placa	S_saida	FIRST 1 MOVE WITH OPERATOR
P5_caixa	1	P4_placa	EXIT	FIRST 1
P5_caixa	1	P5_caixa	M4_fresadora	FIRST 1 MOVE WITH OPERATOR
P5_caixa	1	P5_caixa	EM4	FIRST 1 MOVE WITH OPERATOR
P5_caixa	1	P5_caixa	M4_fresadora	FIRST 1 MOVE WITH OPERATOR
P5_caixa	1	P5_caixa	M2_torno_mecanico	FIRST 1 MOVE WITH OPERATOR
P5_caixa	1	P5_caixa	EM2	FIRST 1 MOVE WITH OPERATOR
P5_caixa	1	P5_caixa	M2_torno_mecanico	FIRST 1 MOVE WITH OPERATOR
P5_caixa	1	P5_caixa	M5_furadeira	FIRST 1 MOVE WITH OPERATOR
P5_caixa	1	P5_caixa	EM5	FIRST 1 MOVE WITH OPERATOR
P5_caixa	1	P5_caixa	M5_furadeira	FIRST 1 MOVE WITH OPERATOR
P5_caixa	1	P5_caixa	S_saida	FIRST 1 MOVE WITH OPERATOR
P5_caixa	1	P5_caixa	EXIT	FIRST 1

```

*****
* Chegadas
*****

```

Entidade	Local	Quantidade	Primeira Vez	Ocorrências	Frequência Lógica
P1_eixo	E_entrada	40	0		1
P2_engrenagem	E_entrada	240	0		1
P3_flange	E_entrada	80	0		1
P4_placa	E_entrada	20	0		1
P5_caixa	K_entrada	20	0		1