

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

Carla Simone Ruppenthal Neumann

**SISTEMÁTICA PARA AVALIAÇÃO E MELHORIA DA
FLEXIBILIDADE DE *LAYOUT* EM AMBIENTES DINÂMICOS**

Porto Alegre
2009

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

Carla Simone Ruppenthal Neumann

**SISTEMÁTICA PARA AVALIAÇÃO E MELHORIA DA
FLEXIBILIDADE DE *LAYOUT* EM AMBIENTES DINÂMICOS**

**Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de
Produção como requisito parcial à obtenção do título de**

DOUTOR EM ENGENHARIA

Área de concentração: Gerência da Produção

Orientador: Flávio Sanson Fogliatto, Ph.D.

Banca Examinadora:

Flávio José Lorini, Dr.

Prof. PROMEC/ UFRGS

Francisco José Kliemann Neto, Dr.

Prof. PPGE/ UFRGS

Paulo Maurício Selig, Dr.

Prof. UFSC

Porto Alegre
2009

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

Carla Simone Ruppenthal Neumann

Esta tese foi julgada adequada para a obtenção do título de Doutor em Engenharia aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora designada pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção

**Prof. Flávio Sanson Fogliatto, Ph.D.
Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Coordenador PPGEP/UFRGS
Orientador**

Banca Examinadora:

**Flávio José Lorini, Dr.
Prof. PROMEC/ UFRGS**

**Francisco José Kliemann Neto, Dr.
Prof. PPGEP/ UFRGS**

**Paulo Maurício Selig, Dr.
Prof. UFSC**

“Volta teu rosto sempre na direção do sol, e então,
as sombras ficarão para trás”.

Sabedoria oriental.

AGRADECIMENTOS

A meu orientador Professor Flávio Sanson Fogliatto pelo exemplo, pelos sábios conselhos e pela dinâmica de desenvolvimento do trabalho.

Aos professores da banca pelas considerações pertinentes ao tema.

Ao CNPq e ao Programa de Pós Graduação em Engenharia de Produção da UFRGS pela oportunidade da bolsa de pesquisa.

Aos profissionais da Empresa pela chance de aplicar e adaptar os conceitos teóricos ao chão-de-fábrica.

Aos meus alunos pela oportunidade de desenvolver e aprimorar a didática.

Aos colegas e amigos do LOPP pelas conversas estimulantes e trocas de opiniões.

Aos meus familiares, pais, irmãos, cunhados e sogros pelo apoio ao longo do desenvolvimento do trabalho.

A minha amada filha Amália pela fantástica ingenuidade com que me recebia ao retornar para casa diariamente e pela oportunidade de compartilhar de seu “mundo da imaginação”.

A meu esposo Gustavo por ser fonte inesgotável de encorajamento, reabastecimento, auxílio e amor.

Sobretudo a Deus, pelo dom da vida.

RESUMO

Tradicionalmente, para que um *layout* possa ser avaliado, devem-se focar fatores de proximidade e de adjacência, já que os mesmos aumentam a eficiência da movimentação de materiais, o que reduz custos operacionais. Adicionalmente, se sugere acrescentar robustez, flexibilidade, suficiência e utilização do espaço a esses fatores. Nesta tese se apresenta uma sistemática de avaliação e melhoria da flexibilidade de *layout* em ambientes dinâmicos. Mais explicitamente, propõe-se mensurar os habilitadores de flexibilidade de um *layout*, ou seja, que o torna capaz de reagir às incertezas externas e internas que surgem à medida que mudam as necessidades futuras da produção. A sistemática proposta é desenvolvida em dez etapas, as quais partem de matrizes semelhantes as do *Quality Function Deployment* (QFD) para verificar o impacto de fatores de proximidade de departamentos, de utilização de área e de associação com outros tipos de flexibilidade de manufatura na flexibilidade de *layout*. A tese também traz uma proposta de análise reversa do QFD para comparar o que está realmente sendo valorado pela instalação ao ponderar os indicadores medidos. As proposições apresentadas são ilustradas em um caso prático de uma empresa do setor metal mecânico, representado pela sistemática, pelos índices de flexibilidade de *layout* e pelos direcionamentos de melhoria.

Palavras-chave: flexibilidade de *layout*, sistemática e ambientes dinâmicos.

NEUMANN, C.S.R. *Sistemática para avaliação e melhoria da flexibilidade de layout em ambientes dinâmicos*. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2009.

ABSTRACT

In the traditional evaluation of layouts emphasis is placed on factors such as proximity and adjacency, as they increase materials handling efficiency, reducing operational costs. It is usually recommended to consider additional factors in the analysis, such as robustness, flexibility, sufficiency and use of space. In this dissertation we propose a method to evaluate and improve layout flexibility in dynamic environments. More explicitly, we propose measuring the enablers of a layout that are capable of reacting to external and internal uncertainties that arise as production needs change. The proposed method is implemented in ten stages. We start using matrices similar to those in the Quality Function Deployment (QFD) method to measure the impact of proximity between departments, use of production space, and association with other types of manufacturing flexibility on layout flexibility. The thesis also presents a proposition where the traditional QFD analysis is performed in reverse. The propositions presented are illustrated in a case study from the metal component processing sector.

Key-words: layout flexibility, method and dynamics environments

NEUMANN, C.S.R. *A method to measure and improve layout flexibility in dynamic environments*. Dissertation (Doctorate in Engineering) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2009.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Modelo de flexibilidade de manufatura adaptado de Gerwin (1987).....	25
Figura 2: Balanço entre incerteza e flexibilidade de manufatura.....	28
Figura 3: Modelo conceitual para alcançar a flexibilidade de manufatura.....	30
Figura 4: Modelo unificado de flexibilidade de manufatura.....	36
Figura 5: Modelo hierárquico dos tipos de flexibilidade de manufatura.....	38
Figura 6: Relacionamento entre os tipos de flexibilidade de manufatura.....	47
Figura 7: Representação discreta (a) e contínua (b) do <i>layout</i>	54
Figura 8: Modelo de referência para o problema do <i>layout</i>	59
Figura 9: Problemas de <i>layout</i> reconfigurável, dinâmico e robusto.....	62
Figura 10: Efetividade do <i>layout</i>	70
Figura 11: Flexibilidade do <i>layout</i>	73
Figura 12: Etapas da sistemática para avaliação e melhoria da flexibilidade de <i>layout</i> em ambientes dinâmicos.....	76
Figura 13: Estrutura genérica de fatores e indicadores.....	77
Figura 14: Estrutura de fatores primários e secundários.....	78
Figura 15: Listagem de fatores primários, secundários e terciários definidos.....	79
Figura 16: Listagem dos indicadores definidos.....	85
Figura 17: Estrutura genérica da árvore de flexibilidade de <i>layout</i>	86
Figura 18: Estrutura genérica da matriz de flexibilidade de <i>layout</i>	89
Figura 19: Fluxograma do processo produtivo.....	99
Figura 20: Fluxograma do processo produtivo de uma carreta típica.....	100
Figura 21: Fluxo de materiais.....	101
Figura 22: Análise da ocupação do espaço atual.....	102
Figura 23: Árvore de flexibilidade de <i>layout</i> elaborada na empresa.....	104

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Pesquisa empírica em flexibilidade de manufatura	24
Tabela 2: Relação autores e dimensões da flexibilidade de manufatura	26
Tabela 3: Associação dos tipos de flexibilidade de manufatura e incerteza	33
Tabela 4: Classificação dos tipos de flexibilidade de manufatura.....	34
Tabela 5: Ligações entre os diferentes tipos de flexibilidade de manufatura.....	35
Tabela 6: Definições de tipos de flexibilidade de manufatura adotadas	39
Tabela 7: Indicadores dos diferentes tipos de flexibilidade de manufatura	44
Tabela 8: Relacionamento entre tipos de flexibilidade de manufatura	48
Tabela 9: Conjunto de grupos, classes e critérios para avaliação de <i>layout</i>	56
Tabela 10: Estrutura dos critérios de fluxo e de ambiente	57
Tabela 11: Escolha do tipo do <i>layout</i> em função do grau de incerteza com respeito às necessidades futuras da produção e do custo do rearranjo do <i>layout</i>	61
Tabela 12: Princípios de avaliação de <i>layout</i> em ambientes dinâmicos.....	69
Tabela 13: Listagem de fatores terciários em ordem decrescente de IFF_i^* %.....	106
Tabela 14: Listagem de indicadores em ordem decrescente de IFF_j	107
Tabela 15: Sub índices de priorização dos indicadores medidos	109
Tabela 16: Sub índices de priorização dos indicadores melhorados	111
Tabela 17: Comparação entre os fatores terciários utilizando o cálculo reverso do QFD	113

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	12
1.1 OBJETIVOS	15
1.2 JUSTIFICATIVA	16
1.3 MÉTODO DE PESQUISA.....	18
1.4 ESTRUTURA.....	19
1.5 DELIMITAÇÕES.....	20
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
2.1 FLEXIBILIDADE DE MANUFATURA	21
2.1.1 Definições da flexibilidade de manufatura	26
2.1.2 Classificação da flexibilidade de manufatura	31
2.1.3 Medição da flexibilidade de manufatura	40
2.1.4 Correlações entre as diferentes flexibilidades de manufatura	47
2.2 <i>LAYOUT</i>	49
2.2.1 Relações entre atividades de produção e <i>layout</i>	50
2.2.2 Abordagem algorítmica.....	52
2.2.3 Abordagem metodológica	54
2.2.4 Avaliação de <i>layout</i>	55
2.3 <i>LAYOUTS</i> EM AMBIENTES DINÂMICOS	58
2.3.1 Classificação dos <i>layouts</i> em ambientes dinâmicos.....	60
2.3.1.1 <i>Layout</i> Dinâmico	63
2.3.1.2 <i>Layout</i> Robusto	64
2.3.1.3 <i>Layout</i> Reconfigurável.....	66
2.3.1.4 <i>Layout</i> Distribuído	66
2.3.2 Indicadores de <i>layouts</i> em ambientes dinâmicos.....	68
2.4 COMENTÁRIOS FINAIS	71
3 CONSTRUÇÃO DA SISTEMÁTICA PARA AVALIAÇÃO E MELHORIA DE FLEXIBILIDADE DE <i>LAYOUT</i> EM AMBIENTES DINÂMICOS.....	73
3.1 DETERMINAÇÕES PRELIMINARES	74
3.2 ETAPA I – DESDOBRAMENTO DOS FATORES PRIMÁRIOS, SECUNDÁRIOS, TERCIÁRIOS E INDICADORES	76
3.2.1 Análise do fator primário proximidade dos departamentos.....	79
3.2.2 Análise do fator primário utilização da área produtiva.....	81
3.2.3 Análise do fator primário associação com outros tipos de flexibilidade.....	82
3.2.4 Análise dos indicadores	84

3.3 ETAPA II – PREPARAÇÃO DA EQUIPE DE TRABALHO	85
3.4 ETAPA III – ELABORAÇÃO DA ÁRVORE DE FLEXIBILIDADE DE <i>LAYOUT</i>	86
3.5 ETAPA IV – ELABORAÇÃO DA MATRIZ DE FLEXIBILIDADE DE <i>LAYOUT</i>	89
3.6 ETAPA V – MEDIÇÃO DOS INDICADORES DE FLEXIBILIDADE DE <i>LAYOUT</i>	90
3.7 ETAPA VI – CÁLCULO DO ÍNDICE GERAL DE FLEXIBILIDADE DE <i>LAYOUT</i>	91
3.8 ETAPA VII – CÁLCULO DO ÍNDICE MELHORADO DE FLEXIBILIDADE DE <i>LAYOUT</i>	92
3.9 ETAPA VIII – CÁLCULO DAS CONDIÇÕES REAIS DE FLEXIBILIDADE DE <i>LAYOUT</i>	93
3.10 ETAPA IX – INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS	94
3.11 ETAPA X – PROPOSIÇÃO DE MELHORIAS	95
3.12 COMENTÁRIOS FINAIS	96
4 VALIDAÇÃO DA SISTEMÁTICA PARA AVALIAÇÃO E MELHORIA DE FLEXIBILIDADE DE <i>LAYOUT</i> EM AMBIENTES DINÂMICOS.....	97
4.1 ETAPA II – PREPARAÇÃO DA EQUIPE DE TRABALHO	97
4.1.1 Apresentação da empresa e do mercado	97
4.1.2 Principais produtos e processos	98
4.1.3 Análise genérica de fluxos e de ocupação de áreas	101
4.2 ETAPA III – ELABORAÇÃO DA ÁRVORE DE FLEXIBILIDADE DE <i>LAYOUT</i>	102
4.3 ETAPA IV – ELABORAÇÃO DA MATRIZ DE FLEXIBILIDADE DE <i>LAYOUT</i>	105
4.4 ETAPA V – MEDIÇÃO DOS INDICADORES DE FLEXIBILIDADE DE <i>LAYOUT</i> ..	107
4.5 ETAPA VI – CÁLCULO DO ÍNDICE GERAL DE FLEXIBILIDADE DE <i>LAYOUT</i> ..	108
4.6 ETAPA VII – CÁLCULO DO ÍNDICE MELHORADO DE FLEXIBILIDADE DE <i>LAYOUT</i>	110
4.7 ETAPA VIII – CÁLCULO DAS CONDIÇÕES REAIS DE FLEXIBILIDADE DE <i>LAYOUT</i>	111
4.8 ETAPA IX – INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS	115
4.9 COMENTÁRIOS FINAIS	116
5 CONCLUSÕES.....	118
REFERÊNCIAS	121
APÊNDICE A – Indicadores utilizados.....	131
APÊNDICE B – Matriz de flexibilidade de <i>layout</i>.....	138

1 INTRODUÇÃO

O aumento da competição global, as crescentes variações de produtos, a alta qualidade de tecnologia de inovações, a pressão pela redução dos custos de produção, o alto valor final dos produtos e a mudança de foco das empresas para a pesquisa e o desenvolvimento têm mantido a Engenharia de Produção com uma tarefa importante: tornar o sistema de manufatura flexível. O objetivo ao se tornar flexível é alcançar produtividade, satisfação dos empregados e funcionamento estável nas condições dinâmicas que caracterizam o cenário competitivo atual (ZELENOVIC, 1982; DIXON, 1992). O desenvolvimento dos sistemas de manufatura flexíveis e dos sistemas de manufatura integrados por computador potencialmente auxiliariam no aumento da flexibilidade e gerariam mudança da base de competição, mas têm sido pouco efetivos, na prática, em seu objetivo. Pesquisas têm demonstrado que a tecnologia, isoladamente, não produz os resultados desejados: nesse sentido, tem se verificado uma grande dependência dos fatores humanos, gerenciais e ambientais, também chamados de externos à empresa (JAIKUMAR, 1986; KOUVELIS *et al.*, 1992; TINCKNELL E RADCLIFFE, 1996; BOYER *et al.*, 1997; OKE, 2005). Especificamente em termos de *layout*, Benjaafar *et al.* (2002) enfocam as tendências que têm sido observadas na indústria e que têm transformado os problemas de projeto de *layout*. Mencionam as práticas de terceirização de partes inteiras de processos para fornecedores externamente localizados, a customização tardia de produto (formação de plataformas), a duplicação total de partes do processo de manufatura, a utilização crescente de máquinas flexíveis na capacidade e na disposição como catalisadores desta mudança.

O planejamento do *layout* de uma instalação objetiva realizar uma combinação ótima entre a disposição dos elementos que configuram as instalações industriais e sua utilização, gerada pela existência dos diferentes fluxos da produção dos diferentes produtos. Visa também harmonizar e integrar equipamentos, mão-de-obra, materiais, áreas de movimentação, áreas de estocagem, áreas administrativas, mão-de-obra indireta, enfim, todos os itens que possibilitam a atividade industrial. Ao se elaborar, portanto, o planejamento de *layout* deve-se procurar a disposição que melhor conjugue equipamentos, força de trabalho, produtos, fases do processo ou serviço, de forma a permitir o rendimento máximo dos fatores de produção. Verifica-se que o planejamento do *layout* das instalações é essencialmente dinâmico, pois ao se modificar qualquer um dos elementos anteriormente citados, o arranjo físico existente pode se tornar inadequado. A maior ou menor necessidade das alterações de *layout* depende de condições particulares em cada cenário analisado. Na prática, alterações constantes no *layout*,

de forma geral, apenas são toleradas quando o custo de realizar a mudança é pequeno ou quando a interrupção da produção não causar grandes transtornos (TOMPKINS *et al.*, 1996; BENJAAFAR *et al.*, 2002; LAHMAR E BENJAAFAR, 2005; MENG *et al.*, 2004).

Verifica-se que o problema de melhoria de um *layout* tem sobreposição com outras áreas tradicionais, como controle, qualidade, manutenção, vendas, produção, financeira, entre outras; por isso, assume relevância maior do que apenas determinar o melhor ‘arranjo físico’ para um conjunto momentâneo de produtos a serem produzidos. Um bom *layout* pode tolerar, por exemplo, pouco controle da produção ou grande variação na demanda de itens. Porém, se o *layout* não for adequado, problemas como falta de controle da produção, alta variação na demanda de itens, falta de qualidade e falta de planejamento da produção, entre outros, podem ser potencializados (VOLLMANN E BUFFA, 1966). Devido a esta sobreposição, a solução de muitos problemas de *layout* esbarra na resolução de problemas de planejamento e controle da produção, de roteamento dos produtos, de escolha de bons fornecedores de matérias-primas e de adequação à estrutura predial existente, além da determinação do melhor fluxo dentro do arranjo físico existente. Por este motivo, a solução pode se tornar complexa, demorada e custosa; assim, na prática freqüentemente se prefere conviver com as ineficiências de um *layout*.

Observa-se que tem crescido o número de autores que enfocam ambientes com alta turbulência e volatilidade, mas cujos *layouts* também absorvem mudanças com facilidade (ROSENBLAT E LEE, 1987; VENKATADRI *et al.*, 1997; YANG E PETERS, 1998; ASKIN *et al.*, 1999; KOCHAR E HERAGU, 1999; MONTREIL *et al.*, 1999; BENJAAFAR E SHEIKHZADEH, 2000; HERAGU E ZIJM, 2001; BENJAAFAR *et al.*, 2002; LAHMAR E BENJAAFAR, 2005; MENG *et al.*, 2004; ELMARAGHY, 2006; IRANI E HUANG, 2006). Os *layouts* dinâmicos, flexíveis ou reconfiguráveis, como é designada essa nova geração de *layouts*, são mais flexíveis e respondem rapidamente às incertezas e à variabilidade do *mix* de produtos, a variações no volume de produção, a variações na quantidade demandada e ao encurtamento do ciclo de vida dos produtos.

Em termos de *layout*, a flexibilidade, pode ser alcançada de duas formas: gerando robustez às necessidades da produção a serem alteradas e buscando adaptabilidade para o *layout* decorrente (YANG E PETERS, 1998). Os critérios de projeto convencionais, que determinam que é mais apropriado organizar um *layout*, por exemplo, dispendo máquinas da forma funcional ou em linhas e posteriormente verificando a eficiência da movimentação de materiais, não atendem a estes requisitos, pois não consideram que ocorra alguma alteração na produção. Esses critérios falham em captar as prioridades de uma instalação com *layout*

flexível, pois, neste caso, escopo tem mais importância que escala, correspondência tem mais importância do que custo e reconfigurabilidade têm mais importância do que eficiência (BENJAAFAR *et al.*, 2002). As diferentes estratégias de resolução real do problema dependem do grau de incerteza das necessidades futuras da produção e do custo de rearranjo do *layout*. Por exemplo, no caso de existirem grandes incertezas quanto às necessidades futuras da produção, aliadas a grandes custos de rearranjo do *layout*, geralmente uma boa opção é um *layout* distribuído, ou seja, desagregar os departamentos funcionais e distribuir máquinas/departamentos considerados chaves para a produção pela planta (BENJAAFAR *et al.*, 2002; LAHMAR E BENJAAFAR, 2005).

Sob o ponto-de-vista da flexibilidade de manufatura, a mesma se manifesta pela adaptabilidade da empresa a diferentes ambientes, sujeito a incertezas internas e externas (SETHI E SETHI, 1990). Newman *et al.* (1993) propõem que todas as respostas do sistema de manufatura advêm do jogo de forças entre flexibilidade, incertezas internas ou externas e *buffers*, representado pelos dois lados de uma balança e o deslocamento do centro de apoio deste sistema. Upton (1994, 1995 e 1997) sintetiza que ser flexível é acomodar uma grande variedade de mudanças, absorver as penalizações sofridas durante a transição/mudança para se tornar flexível e permanecer constante no desempenho depois que as mesmas tiverem sido consolidadas. O autor afirma que flexibilidade é a habilidade de mudar ou de reagir com pouca penalidade em tempo, esforços, custos e desempenho.

Observa-se que podem ser realizados agrupamentos de fatores que determinam a necessidade da flexibilidade de manufatura em um sistema produtivo: os relacionados com o mercado e os relacionados com os processos de manufatura (internos ou externos), como o processo dos fornecedores (GUSTAVSSON, 1984; KUMAR, 1987; KARA E KAYIS, 2004). Fatores relacionados com o mercado incluem o aumento da variabilidade na demanda, encurtamento dos ciclos de vida de produtos e tecnologias, diversidade de produtos, aumento da customização e encurtamento dos tempos de entrega. Fatores relacionados com os processos de manufatura dizem respeito às incertezas quanto à quebra de máquinas, à qualidade das matérias primas do processo, ao tempo de fornecimento e às variações na força de trabalho (KARA E KAYIS, 2004).

A literatura classifica, ainda que não da mesma forma, diferentes tipos de flexibilidade de manufatura; como se os tipos representassem os objetos sobre os quais a incerteza incide (GERWIN, 1987 e 1993; BROWNE *et al.*, 1984; SETHI E SETHI, 1990; SUAREZ *et al.*, 1995). Por exemplo, se pode ter flexibilidade nas máquinas, no sistema de

movimentação, no lançamento de novos produtos, no *mix* de produtos oferecidos, no roteamento da produção, na força de trabalho empregada e assim por diante.

Paralelamente, Webster e Tyberghein (1980) e Yang e Peters (1998) definem a flexibilidade de *layout* como a habilidade do mesmo reagir efetivamente às várias mudanças que decorrem das transformações incessantes das necessidades dos clientes e dos distúrbios internos do negócio em termos de custo e tempo. Por outro lado, observa-se que a flexibilidade de *layout* não é um dos tipos de flexibilidade de manufatura definidos comumente pelos autores que discorrem sobre este tema. Entretanto, se as definições comumente empregadas para o termo *layout* e os diferentes tipos de flexibilidade de manufatura forem analisadas com cuidado, observa-se que a flexibilidade de *layout* pode ser tomada como um tipo de flexibilidade que engloba um conjunto, com diferentes combinações de tipos de flexibilidade tradicionalmente reconhecidos. Assim sendo, deseja-se determinar em que grau os diferentes tipos de flexibilidade de manufatura impactam em um *layout* mais adequado a uma situação ou a outra.

Conseqüentemente, existe a necessidade de desenvolver ferramentas que permitam ponderar diferentes fatores para determinar a flexibilidade de um *layout* e torná-lo apto a reagir às incertezas a que está submetido (BENJAAFAR *et al.*, 2002), sejam elas internas ou . Por exemplo, pode-se utilizar; (i) indicadores relacionados aos diferentes tipos de flexibilidade de manufatura consagrados pela literatura que impactam na flexibilidade de *layout*; e (ii) fatores tradicionais de *layout* que integrem indicadores como proximidade de departamentos e adequada utilização da área produtiva.

1.1 OBJETIVOS

O objetivo geral desta tese é elaborar uma sistemática de avaliação e melhoria da flexibilidade de um *layout* considerando que a empresa está inserida em um ambiente dinâmico. Esta sistemática é baseada em fatores de proximidade de departamentos, de utilização de área produtiva e de associação com outros tipos de flexibilidade de manufatura. Os indicadores, de forma geral, avaliam a flexibilidade do *layout* no nível macro (fluxo entre departamentos) e micro (fluxo dentro dos departamentos), embora possam redirecionar para ações no nível supra (necessidade de determinar novo prédio ou nova localização física).

Os objetivos associados às etapas da metodologia são os seguintes: (i) desdobrar os fatores primários, secundários e terciários que têm importância no aumento da flexibilidade do *layout*; (ii) estabelecer pesos de importância para cada fator; (iii) estabelecer indicadores

para medir a flexibilidade do *layout*; (iv) estabelecer a intensidade de relacionamento de cada indicador ao conjunto de fatores terciários; (v) priorizar os indicadores; (vi) medir localmente os níveis de cada indicador; (vii) calcular um índice geral de flexibilidade; (viii) calcular um índice ideal de flexibilidade de *layout*; (ix) avaliar as potencialidades reais de flexibilidade de *layout* e; (x) verificar as principais oportunidades de melhoria do *layout* da instalação.

Como objetivos específicos podem-se enumerar:

- a) Sistematizar o conhecimento sobre flexibilidade de manufatura e o impacto dos diferentes tipos de flexibilidade de manufatura na flexibilidade do *layout*;
- b) Sistematizar o conhecimento sobre a nova geração de *layouts* para ambientes dinâmicos, flexíveis e reconfiguráveis, nos quais existe grande incerteza e volatilidade quanto aos requisitos da produção;
- c) Propor uma forma mista de medir a flexibilidade de um *layout*, que contenha tanto informações diretamente relacionadas, tradicionalmente, com *layout* (como distância percorrida para produzir um produto típico) quanto outras, indiretamente relacionadas (como acurácia na previsão de demanda);
- d) Auxiliar na tomada de decisões de médio e curto prazos, priorizando e agrupando ações de acordo com a importância atribuída em diferentes cenários específicos.

1.2 JUSTIFICATIVA

Observando-se o cenário de avaliação de diferentes configurações de *layout* verifica-se que o mesmo apresenta carências. Majoritariamente, a avaliação e a proposição de melhorias de um *layout* baseiam-se na solução apresentada por algoritmos computacionais que geralmente são sujeitos a restrições que acabam por representar a realidade de forma simplista. Geralmente, a solução apresentada enfoca a redução dos custos por minimizar a distância e por maximizar a adjacência de departamentos que devam ficar próximos, de modo aproximadamente estático (FRANCIS *et al.*, 1992). Entretanto, não se pode desprezar que o *layout* é parte integrante de um sistema de manufatura, que apresenta características dinâmicas e complexidade singular. Assim sendo, pode-se avaliar um projeto de *layout* através de um conjunto de indicadores tradicionais, como distância e adjacência, e torná-lo capaz de operar também em ambientes dinâmicos, flexíveis e facilmente reconfiguráveis (BENJAAFAR *et al.*, 2002; RAMAN *et al.*, 2009a).

Em termos de flexibilidade de manufatura, encontram-se na literatura muitos termos diferentes para os tipos de flexibilidade ou ‘objetos de variação’ (SETHI E SETHI, 1990), e

de forma geral, a flexibilidade de *layout* não é um destes tipos. Pode-se, entretanto, combinar os diferentes tipos de flexibilidade entre si para que o *layout* de uma instalação também tenha flexibilidade, isto é, pode-se mensurar a habilidade que um *layout* tem de mudar para adaptar-se a novas situações e de reagir com pouca penalização em tempo improdutivo, esforços humanos exagerados que não agregam valor ao produto, custos desnecessários e desempenho insatisfatório antes de efetivar as mudanças, ainda na fase de planejamento.

Realizando um paralelo, do mesmo modo que a flexibilidade de manufatura apresenta diferentes dimensões, as quais acrescentam diferentes funções ao sistema (MANDELBAUM, 1978 *apud* GUPTA E GOYAL, 1989; ZELENOVIC, 1982; BUZACOTT, 1982; BROWNE *et al.*, 1984; SLACK, 1983 E 1987; CARTER, 1986 *APUD* PARKER E WITH, 1999; CARLSSON, 1992; SWAMIDASS E NEWELL, 1987; WARD *et al.*, 1995), também em termos de avaliação de flexibilidade de *layout* se buscam diferentes funções. Pode-se realizar análise dos processos e capacidades reais internos, identificar deficiências e enumerar oportunidades de melhoria, sob o ponto-de-vista restrito, aplicado a fluxos, máquinas e departamentos específicos. Também se podem avaliar indicadores de flexibilidade externos, como os ligados ao mercado e ao desenvolvimento de novos produtos, e ver como os mesmos impactam no *layout* da instalação, sob o ponto-de-vista estratégico, aplicado à organização como um todo.

Ainda embasando-se na flexibilidade de manufatura, também em termos de flexibilidade de *layout* é provável que muitas vezes se tenha que fazer escolhas em detrimento de restrições de algum tipo (BUZACOTT, 1982; FIEGENBAUM E KARMANI, 1991; GUPTA E GOYAL, 1992; DAS *et al.*, 1993; OLHAGER, 1993; SHEWCHUK E MOODIE, 2000; VOKURKA E O'LEARY-KELLY, 2000; GUPTA, 2003; ANAND E WARD, 2004; OKE, 2005). Logo, ao enumerar os diferentes fatores terciários que impactam na flexibilidade de *layout*, como por exemplo, existência de configurações modulares, heterogeneidade das máquinas, adequação do fluxo de materiais entre os departamentos, pode-se decidir em quais fatores se farão investimentos para aumentar a flexibilidade e em quais se optará por conviver com as ineficiências. Esta proposição é de grande importância na aplicação prática da sistemática aqui proposta, pois os responsáveis pelas decisões gerenciais tipicamente carecem de direcionadores para ações futuras. Adicionalmente, entende-se que a flexibilidade (ou reconfigurabilidade, dinamicidade, ou robustez) de um *layout* transcende as combinações de flexibilidade de *mix*, de volume e de roteamento, como a literatura específica de *layout* geralmente enfoca. Outras flexibilidades, como, por exemplo, a flexibilidade das máquinas,

do sistema de movimentação de materiais e da força de trabalho devem ser igualmente enfocadas, valoradas e mensuradas.

Assim sendo, uma ferramenta de avaliação e melhoria da flexibilidade do *layout* pode trazer grandes benefícios, pois antes que alguma mudança seja efetivada fisicamente, se procederá a uma análise criteriosa das potencialidades e deficiências da instalação, e se gerará um diagnóstico da situação, levando em conta o ambiente na qual está inserida. Acredita-se que a ferramenta pode sinalizar continuidade/descontinuidade de políticas/ações e pode indicar a seqüência de melhorias efetivadas. A proposição de uma sistemática é justificada por avaliar a flexibilidade de um *layout* conjuntamente sob o aspecto dos fatores tradicionais de avaliação de *layouts* (proximidade de departamentos e utilização de área) e sob o aspecto mais recente, dinâmico, se associa com outros tipos de flexibilidade de manufatura já estudados.

1.3 MÉTODO DE PESQUISA

Os caminhos ou instrumentos, como colocado por Garcia (1998), levam a realizar a pesquisa de forma eficiente, ou não. Já o método representa um procedimento racional e ordenado da forma de pensar, que leva a utilizar, de forma adequada, a leitura, a reflexão, a experimentação, os resultados e a contextualização para seguir ao longo de um caminho (a metodologia) e alcançar os objetivos da pesquisa. Para Cervo e Bervian (2002), o método científico define a ordem a que são impostos os diferentes conjuntos de processos utilizados para investigar e atingir certo fim. De acordo com Henenberg (1976) *apud* Lakatos e Marconi (1993), método é o caminho pelo qual se chega a determinado resultado, ainda que esse caminho não tenha sido fixado de antemão, de modo refletido e deliberado.

Sob o ponto-de-vista da natureza, esta pesquisa é classificada como aplicada, visto que gera conhecimentos úteis à solução de problemas reais; sob o ponto-de-vista da forma de abordagem do problema, esta pesquisa é classificada como qualitativa; sob o ponto-de-vista de seus objetivos, é classificada como explicativa, pois visa identificar os fatores que determinam ou contribuem para aumentar a flexibilidade de um *layout*, e aprofunda o conhecimento da realidade porque explica a razão dos fatos e o encadeamento dos fatores; sob o ponto-de-vista dos procedimentos técnicos é classificada como pesquisa experimental, pois se determina um objeto de estudo, selecionam-se as variáveis que seriam capazes de influenciá-lo e definem-se as formas de medição, de controle e de observação dos efeitos que a variável produz no objeto (SILVA E MENEZES, 2000).

As etapas seguidas para desenvolver o trabalho são as seguintes:

ETAPA 1 - Revisão da literatura - nesta etapa são estudados os fatores e os indicadores encontrados nas áreas de sistema de manufatura e de *layout* que auxiliam na avaliação e na melhoria da flexibilidade de *layout*;

ETAPA 2 - Estabelecimento dos fatores e dos indicadores de flexibilidade de *layout* - nesta etapa são determinados os fatores (subdivididos em primários, secundários e terciários) que colaboram para aumentar a flexibilidade de um *layout*, aos quais são atribuídos pesos de importância diferenciados; se determinam os indicadores e posteriormente a intensidade de relacionamento de cada fator com cada indicador, e o peso de importância de cada indicador na sistemática proposta.

ETAPA 3 - Medição real dos indicadores priorizados - nesta etapa é realizada a medição dos indicadores priorizados verificando o seu *status* em relação ao ótimo ou ao possível. Também são realizadas adaptações e simplificações na sistemática proposta;

ETAPA 4 - Construção dos índices geral, melhorado e real de flexibilidade de *layout* - nesta etapa são utilizadas ferramentas matemáticas e estatísticas para compor índices geral, melhorado e real de flexibilidade de *layout*, que reflitam as condições reais e possíveis (desejadas e viáveis de execução) da instalação em termos de flexibilidade de *layout*;

ETAPA 5 - Ajustes dos índices de flexibilidade de *layout* e auxílio na tomada de decisão prática – nesta etapa são realizados ajustes nos valores da intensidade de relacionamento entre fatores terciários e indicadores com o objetivo de evitar discrepâncias observadas. Também são realizadas adequações que forem julgadas importantes para refletir a realidade da instalação. Ao final, são indicadas ações para melhoria efetiva da flexibilidade do *layout* avaliado.

1.4 ESTRUTURA

Esta tese é composta de cinco capítulos, estruturados conforme descrição a seguir.

No primeiro capítulo são apresentados o tema e o cenário no qual o tema se insere, o objetivo geral e específicos a serem alcançados, a justificativa, o método de pesquisa, a estrutura da tese e suas delimitações, contextualizando os conceitos tratados neste trabalho.

No segundo capítulo é apresentada a revisão bibliográfica. Inicia-se abordando a flexibilidade de manufatura, enfocando definições, classificação, medição e correlações entre as diferentes flexibilidades de manufatura. Na parte referente ao *layout*, verifica-se a importância do planejamento e da melhoria do mesmo, apresentam-se os critérios utilizados pela maioria dos algoritmos, apresentam-se formas de avaliação de melhorias implementadas.

Finaliza-se abordando os tipos de *layouts* em ambientes dinâmicos, sua classificação e diferenciação, e seus indicadores.

No terceiro capítulo é apresentada sistemática de avaliação e melhoria da flexibilidade de *layout*.

No quarto capítulo é realizada a validação prática em uma empresa da sistemática de avaliação e melhoria de *layout*.

No quinto capítulo são apresentadas as conclusões obtidas com o desenvolvimento do trabalho. Este capítulo termina com sugestões para o desdobramento de trabalhos relacionados ao tema proposto. As referências são apresentadas ao final do documento. Os apêndices também fazem parte desta tese.

1.5 DELIMITAÇÕES

Neste trabalho, a definição de *layout* é tomada no sentido amplo, estratégico, não apenas no sentido mais conhecido das palavras ‘arranjo físico’ e, sim, no sentido de ‘projeto de instalações’. Não significa apenas definir se um determinado espaço será funcional, em linha, celular, misto, e em virtude da realidade atual determinar entradas e saídas de materiais e posicionar móveis e máquinas neste espaço. As incertezas a que a manufatura está submetida devem ser consideradas para tornar o projeto da instalação viável também em determinados períodos no futuro.

O foco deste trabalho se restringe ao *layout* de áreas produtivas, que realizam a transformação de matérias-primas em produtos, associados aos sistemas de produção de peças discretas. Para a aplicação dos métodos propostos neste estudo ao *layout* de instalações de serviço, espera-se ser necessário algum tipo de adaptação.

O foco deste trabalho não são as características, componentes, ou necessidades dos sistemas flexíveis de manufatura (FMS), mas a sua flexibilidade, entendida como um conceito, indicando direções para as mudanças possíveis baseadas em custo-benefício. Da mesma forma, não se pretende avaliar a flexibilidade de *layout* de instalações que sejam FMS, e sim, de qualquer *layout* fabril.

Não se pretende avaliar capacidade, eficiência, disponibilidade, variedade de peças produzidas por cada máquina ou departamento, conforme Brill e Mandelbaum (1989) e produzir um número único; deseja-se, aplicar uma sistemática que, além de apresentar um valor numérico, também represente uma situação e direcione para ações futuras.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica desta tese aborda três temas: a flexibilidade de manufatura, o *layout* de instalações e o *layout* em ambientes dinâmicos. O objetivo, ao apresentar os temas nesta seqüência é promover o encadeamento dos mesmos, uma vez que o sistema de manufatura requer um projeto de *layout* de instalações adequado e, em termos de manufatura, está inserido em um ambiente dinâmico.

Além disto, na sistemática proposta no Capítulo 3, são propostos três fatores primários que impactam na flexibilidade de um *layout*: **associação com outros tipos de flexibilidade de manufatura, proximidade de departamentos e utilização de área**. O fator de associação com outros tipos de flexibilidade de manufatura é embasado no primeiro assunto abordado neste capítulo. Como a flexibilidade de *layout* não é um dos tipos de flexibilidade de manufatura comumente classificados e estudados, supõe-se que a flexibilidade do *layout* seja definida, classificada, mensurada e apresente correlacionamentos semelhante à dos outros elementos pertencentes ao sistema de manufatura. Os fatores proximidade de departamentos e utilização de área são fortemente embasados no segundo assunto abordado neste capítulo. Conforme mencionado no Capítulo 1, neste trabalho o termo *layout* também tem a conotação de ‘projeto de instalações’, utilizando o sentido amplo de arranjo físico. Por fim, os três fatores primários são motivados e embasados no terceiro assunto abordado neste capítulo, que é o mais recente na literatura: o *layout* em ambientes dinâmicos.

2.1 FLEXIBILIDADE DE MANUFATURA

Para Suarez *et al.* (1995), o século XX trouxe grandes mudanças ao mercado produtivo. Por volta de 1900, a eficiência tornou-se chave estratégica em muitas empresas, motivada pelo sucesso da *Ford Motors* e de sua forma de gerenciamento científico. No meio daquele século, a qualidade emergiu como um novo imperativo estratégico no mercado. O mercado passou a exigir qualidade nos produtos e serviços e não apenas eficiência e baixos preços. Em torno de 1970, a flexibilidade surgiu como diferencial estratégico, respondendo ao aumento da competição global, à volatilidade dos mercados, ao encurtamento do ciclo de vida dos produtos e ao maior poder de compra dos consumidores. Assim sendo, a competitividade de uma empresa passou a ser vista como o resultado das posições que ela ocupa em cada um destes três imperativos estratégicos e do que o mercado determina.

Vantagens em manufatura são obtidas quando a empresa satisfaz a necessidade dos seus clientes em maior grau do que a concorrência. A vantagem competitiva da manufatura pode ser desdobrada em cinco dimensões (Slack, 1983): qualidade, velocidade, confiabilidade, flexibilidade e custo, que respectivamente significa fazer certo, rápido, pontualmente, mudar facilmente o que está sendo feito e fazer com menor custo. Segundo o modelo conceitual de Ward *et al.* (1995), existe uma relação explícita entre o ambiente e a estratégia das operações. O desempenho de um negócio depende do equacionamento interno das prioridades competitivas (baixo custo, qualidade, flexibilidade e desempenho de entrega), dos interesses externos ao ambiente empresarial (custo, disponibilidade de mão-de-obra, competitividade e dinamismo), e da escolha das estratégias operacionais. Vickery *et al.* (1997), realizam uma síntese da literatura sobre prioridades competitivas relacionadas à estratégia da manufatura e listam as seguintes prioridades: flexibilidade de produto e de volume, baixo custo de produção, introdução de novos produtos, velocidade de entrega, confiança na entrega, qualidade (conformidade com as especificações), confiabilidade no produto e qualidade/inação do projeto.

De Meyer *et al.* (1989) apresentam um estudo sobre prioridades competitivas nas indústrias de manufatura norte-americanas, européias e japonesas. Nessa pesquisa solicitou-se que oito prioridades competitivas fossem listadas e ordenadas. Verificou-se que as prioridades competitivas das indústrias norte-americanas e européias são praticamente as mesmas, sendo a flexibilidade de projeto (produto) e a flexibilidade de volume apontadas como a sexta e a oitava prioridades competitivas, respectivamente. Já na indústria japonesa, questões ligadas à flexibilidade aparecem como mais prioritárias sendo que, entre as prioridades de manufatura, a flexibilidade de projeto (produto) e de volume são classificadas em segundo e quarto lugar, respectivamente. Isso pode ser justificado pelo fato desta indústria se encontrar em posição vantajosa relativamente à qualidade de seus produtos tendo, assim, a flexibilidade como meta a ser alcançada. A posição das indústrias norte-americanas e européias relativamente à qualidade não é tão vantajosa; desta forma, aspectos relacionados à qualidade são identificados como prioritários.

A flexibilidade de manufatura é um conceito complexo, multidimensional e de difícil entendimento. O conceito de flexibilidade permanece pouco compreendido na teoria e superficialmente utilizado na prática (SHEWCHUK E MOODIE, 1998). Observa-se que, como ser flexível é algo visto de forma positiva pelo mercado, muitas empresas buscam a flexibilidade mesmo sem um entendimento claro do que isto acarreta em seus processos (SLACK, 1987; LAU, 1999).

Correa e Slack (1994) afirmam que a flexibilidade não é necessariamente desejável em qualquer circunstância, dado que flexibilidade implica em aumento de custos. Ser flexível gera necessidades internas para poder lidar com problemas de projeto, falta de comunicação interna, falha de foco, complexidade excessiva de roteiros produtivos, aumento de produção em final de período, etc. Gerwin (1993) adota uma linha semelhante quando diz que não se deve perder a oportunidade de identificar excessos de flexibilidade e eliminá-los. Ettlíe e Penner-Hahn (1994) afirmam que se as empresas conhecessem seus mercados de forma aprofundada, não precisariam ser flexíveis. Por exemplo, ter melhor conhecimento das características requeridas dos produtos e sobre a expectativa de demanda, bem como antecipar os ciclos de vida dos produtos e as estratégias dos competidores poderia auxiliar a reduzir a magnitude da flexibilidade necessária. A análise das discrepâncias encontradas pode fornecer uma base racional para determinar se a opção é tornar-se mais flexível ou mais focado (BUZACOTT, 1982). No caso de optar por tornar-se mais flexível, Sethi e Sethi (1990) complementam que algumas limitações precisam ser definidas antes de iniciar o processo: velocidade e custo de resposta, descrição e quantidade de recursos a serem investidos e extensão das interrupções no sistema existente.

Para Gupta e Goyal (1989), a flexibilidade de manufatura é uma propriedade do sistema que indica seu comportamento em relação às suas potencialidades e não em relação ao seu desempenho. Inicialmente acreditava-se que flexibilidade não era um conceito que se explicava por si só, necessitando ser aplicado a outros objetivos da produção, como produto, volume e qualidade, aliado a custo e tempo, para ser justificado. Empresas não vendiam flexibilidade e sim disponibilidade, confiabilidade e produtividade (SLACK, 1987). De acordo com Slack (1987), a afirmação de que a flexibilidade é apenas um meio para outro fim, pode ser discutida. Atualmente observam-se relações mais estreitas e transparentes entre clientes e fornecedores, se valorizam atributos menos visíveis e mais intrínsecos e não apenas objetivos de desempenho diretos como custos, qualidade e tempo de entrega (SLACK, 2005). Para muitas empresas, gerenciar a manufatura significa gerenciar toda a rede de suprimentos (que é externa aos seus limites físicos) e não apenas sua própria instalação (SCHMENNER E TATIKONDA, 2005).

Segundo Slack e Correa (1992) é conveniente diferenciar a análise de flexibilidade de manufatura em três níveis:

i) no nível da empresa, onde a flexibilidade é verificada pela habilidade que a organização inteira tem de mudar sua posição estratégica e ainda assim se manter coerente;

ii) no nível das funções ou do sistema, onde a flexibilidade é verificada pela habilidade de mudar a natureza das funções, dos volumes e das saídas da produção;

iii) no nível dos recursos das operações, cuja flexibilidade é observada pela variedade de tarefas de um indivíduo, de uma máquina, de um sistema de controle, associado aos custos, dificuldades e tempo para mudar de tarefa.

De acordo com Suarez *et al.* (1995 e 1996), a pesquisa empírica de flexibilidade de manufatura se divide em quatro grandes grupos: *i*) a que aborda a taxonomia; *ii*) a que relaciona flexibilidade e desempenho; *iii*) a que aborda perspectivas históricas e econômicas; e *iv*) a de revisão e de modelos estratégicos. Os principais autores dos grupos *i*, *ii* e *iv* utilizados neste trabalho estão listados na Tabela 1.

Tabela 1: Pesquisa empírica em flexibilidade de manufatura

Grupo	Autores
Taxonomia	Gerwin (1982, 1987), Buzacott (1982), Zelenovic (1982), Slack (1983, 1987, 2005), Browne <i>et al.</i> (1984), Mandelbaum e Buzacott (1990)
Flexibilidade × desempenho	Jaicumar (1986), Tombak e De Meyer (1988), Gupta e Somers (1992), Benjaafar (1994)
Revisão e modelos estratégicos	Sethi e Sethi (1990), Hyun e Ahn (1992), Gupta e Goyal (1992), Gerwin (1993), De De Toni e Tonchia (1998), Vokurka e O'Leary-Kelly (2000), Oke (2005), Boyle (2006)

Fonte: Suarez *et al.* (1995 e 1996)

Para entender melhor as questões relativas à flexibilidade de manufatura, Schmenner e Tatikonda (2005) propõem um modelo apresentado na Figura 1. Este modelo é baseado no trabalho seminal de Gerwin (1987), o qual também servirá para dar sustentação à estrutura de tópicos desenvolvidos nesta seção. Segundo os autores, os tipos de incerteza [A] a que são submetidas às empresas são a motivação para adquirir os diferentes tipos de flexibilidade [B] e vice-versa. Os mecanismos de flexibilidade [C] compreendem as ferramentas, as práticas gerenciais e os sistemas que podem ser utilizados para alcançar a flexibilidade. Gerwin (1987) enfatiza persuasivamente que a medição da flexibilidade [D] é necessária para caracterizar o cenário anterior. Tomados conjuntamente, [B], [C] e [D] formam as capacidades operacionais de uma empresa relativamente à flexibilidade. Estas capacidades operacionais podem diferenciar marcadamente o seu nível operacional [E], influenciando desde os tipos de máquinas que se possui até o desenho da cadeia de fornecimento. O nível operacional será melhor discutido, neste trabalho, na seção referente ao *layout*.

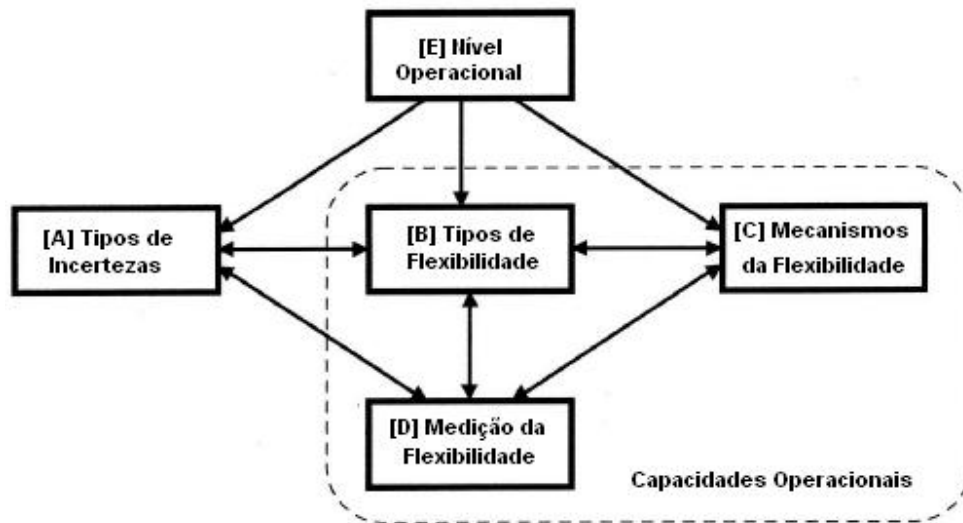


Figura 1: Modelo de flexibilidade de manufatura adaptado de Gerwin (1987)

Fonte: Schmenner e Tatikonda (2005)

Mais recentemente, ElMaraghy (2006) discorre sobre a diferença entre o sistema de manufatura flexível e o sistema de manufatura reconfigurável. Segundo o autor, o sistema de manufatura flexível possui flexibilidade de forma genérica, sendo projetado para antecipar variações no sistema. Suas características são máquinas com estruturas fixas, foco do sistema nas máquinas e custo alto. Já o sistema de manufatura reconfigurável possui tipos de flexibilidade customizada, além de incorporar modularidade de equipamentos, integração entre os diferentes tipos de flexibilidade, ajuste rápido e econômico de configuração para produzir novos produtos e gerar adaptabilidade aos novos produtos, capacidade de permuta e grande capacidade de diagnóstico dos problemas de qualidade e confiabilidade. O objetivo, ao se tornar reconfigurável, é providenciar capacidade e funcionalidade necessárias, quando for necessário. Suas características são: estrutura de máquinas ajustáveis, foco do sistema nas famílias de peças e custo intermediário. As mudanças físicas, para se ter um sistema de manufatura reconfigurável, passam por alterações/adaptações no *layout* (adicionar ou remover módulos), nas máquinas (adicionar ou remover), nos sistemas de movimentação de materiais e nos componentes das máquinas. Num ambiente caracterizado pela competição agressiva em escalas mundiais e pelas rápidas mudanças na tecnologia dos processos, um sistema reconfigurável seria uma mudança visionária nos sistemas de manufatura. Entretanto, tais sistemas não existem na prática, sendo apenas objeto de pesquisas recentes em áreas específicas.

2.1.1 Definições da flexibilidade de manufatura

As definições de flexibilidade de manufatura encontradas na literatura esclarecem e debatem o contexto geral do termo ou referenciam a produção de forma direta. No que diz respeito ao contexto geral, a flexibilidade pode ser entendida como uma característica de interface entre o sistema e o ambiente, como o grau de controle do equilíbrio interno e da eficiência dinâmica e como uma capacidade de adaptação ou mudança. Ao se referir à produção de forma direta, a flexibilidade se caracteriza por verificar os estados que a mesma pode alcançar levando em conta também o tempo e o custo, como consequência da existência da alta variedade e da incerteza de demanda. Ser flexível significa ter baixos custos para mudar, mudar sem desorganização e ter capacidade operacional e estratégica para tal (DE TONI E TONCHIA, 1998).

Sethi e Sethi (1990) abordam a flexibilidade sob as perspectivas da economia, da organização e da manufatura. Sob o ponto de vista da manufatura, a flexibilidade de um sistema é a sua adaptabilidade a diferentes circunstâncias, sujeito a incertezas externas e internas. Em resumo, flexibilidade de manufatura é a capacidade de reconfigurar os recursos para produzir diferentes produtos eficientemente e com qualidade aceitável.

Na Tabela 2 resumem-se algumas dimensões que foram sendo incorporadas ao conceito inicial de flexibilidade de manufatura e que são encontradas na literatura (SHEWCHUCK E MOODIE, 1998; PARKER E WIRTH, 1999). Cada um dos autores listados nesta tabela acrescenta um componente ao conceito de flexibilidade, que é explicado no texto subsequente à tabela.

Tabela 2: Relação autores e dimensões da flexibilidade de manufatura

Autor	Dimensões confrontadas
Mandelbaum (1978) <i>apud</i> Gupta e Goyal (1989)	ação × estado
Zelenovic (1982)	adequação × adaptação × cooperação
Buzacott (1982)	sistema × máquina
Browne et al. (1984)	potencial × real
Slack (1983) e (1987)	amplitude × resposta
Carter (1986) <i>apud</i> Parker e With (1999)	curto × médio × longo prazo
Carlsson (1992)	estático × dinâmico

Fonte: adaptado de Parker e Wirth (1999)

Mandelbaum (1978) *apud* Buzacott (1982) define a flexibilidade de manufatura como sendo a habilidade de responder efetivamente às mudanças que ocorrem. Mandelbaum (1978) *apud* Gupta e Goyal (1989) afirma que a flexibilidade de manufatura pode ser observada e ser necessária em duas situações. Na primeira, quando se tem que tomar decisões sequenciais, sem conhecimento do futuro, representadas por ações externas ao sistema. Na

segunda, quando se tem que tornar um sistema capaz de operar bem em diferentes circunstâncias, sem intervenção externa, representada por um estado interno. Buzacott (1982) resume que, se um sistema possui flexibilidade de ação, a intervenção requerida para mudar vem de fora do sistema; se ele possui flexibilidade de estado, a capacidade de mudar está dentro dele.

Zelenovich (1982) afirma que a flexibilidade de manufatura é a medida de sua capacidade de se adaptar a mudanças que ocorrem devido às condições de contorno (ambientais) e às necessidades do processo. No planejamento do sistema de produção, a flexibilidade pode assegurar produtividade e funcionamento estável mesmo sob condições instáveis. Segundo De Toni e Tonchia (1998), esta definição é importante, pois é a primeira vez que se leva em conta tanto a natureza exógena quanto a natureza endógena da flexibilidade de manufatura: a primeira como consequência da demanda de mercado e a segunda como exploração das oportunidades oferecidas pelas inovações tecnológicas. O autor define dois tipos de flexibilidade de manufatura: a dos elementos estruturais e a da estrutura espacial. Os elementos estruturais são os centros de trabalho, os equipamentos de movimentação de materiais, os *buffers* de estoque, os equipamentos de medição e os sistemas de controle. A flexibilidade dos elementos estruturais pode ser medida tanto pelo grau de adequação do projeto, que é a probabilidade de que a estrutura de produção se adapte às condições ambientais (mercado) e às necessidades do processo, quanto pelo tempo de adaptação ou de transformação. Se as necessidades do ambiente e do processo excedem os limites determinados pelo sistema, a flexibilidade do sistema é inadequada; logo, devem ser encontradas novas condições para a instalação (*layout*). A estrutura espacial são os fluxos de materiais, de informação e de energia. A flexibilidade da estrutura espacial pode ser medida pelo grau de cooperação, que leva em conta o número médio de operações, a capacidade das máquinas, a quantidade produzida em determinado período, o tempo de operação, o grau de similaridade das peças e o grau de utilização do sistema.

Buzacott (1982) concorda com os autores mencionados anteriormente quando afirma que um sistema flexível é aquele capaz de responder às mudanças. A fim de lidar com os efeitos que a mudança gera, o autor define dois tipos de flexibilidade: uma mais geral, designada do sistema (*job*) e outra mais específica, designada das máquinas. Na mesma linha de raciocínio, Newman *et al.* (1993) propõem um contrabalanço da flexibilidade de manufatura com a incerteza, que pode ser representado pelos dois lados de uma balança, conforme a Figura 2.

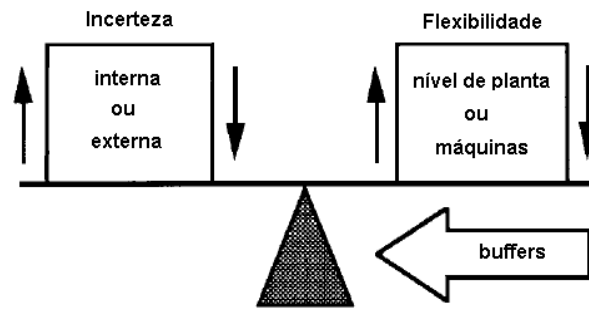


Figura 2: Balanço entre incerteza e flexibilidade de manufatura

Fonte: Newman *et al.* (1993)

No que diz respeito à incerteza, verificam-se componentes externos, como o relacionamento da empresa com os clientes e os fornecedores, e componentes internos, como as falhas, a falta de matérias e os atrasos. A flexibilidade pode ser definida no nível da planta e no nível das máquinas. O centro de apoio deste sistema pode ser movido, com conseqüências óbvias ao balanço do sistema pela ação dos *buffers* do sistema de manufatura, representado pelo aumento dos estoques, pela alocação de capacidade excedente e pela sobre-estimativa do *lead time*. Assim, em caso de aumento da incerteza, é possível contrabalançá-la pelo aumento da flexibilidade ou pelo deslocamento do centro de apoio representado pelos *buffers*. Exemplificando, se a incerteza aumenta, ou seja, o lado esquerdo é empurrado para baixo, a flexibilidade tem que aumentar. Por outro lado, se já foi adquirido certo nível de flexibilidade, mas a incerteza diminui (o lado esquerdo sobe), o mais adequado é deslocar o centro de apoio dos *buffers*. Todas as respostas do sistema de manufatura advêm do jogo de forças destes três elementos: flexibilidade, incerteza e *buffers* (NEUMANN *et al.*, 1993).

Browne *et al.* (1984) introduzem a idéia da flexibilidade potencial e real quando abordam a flexibilidade de roteamento. Segundo os autores, a flexibilidade potencial ocorre quando se possui uma determinada flexibilidade, mas a mesma só é utilizada quando um determinado evento acontece. Por exemplo, normalmente as rotas de processamento são fixas, mas no caso de quebras de máquinas podem-se processar peças em rotas diferentes. A flexibilidade real se refere à flexibilidade que é utilizada independentemente do estado do ambiente. Por exemplo, peças idênticas são processadas em rotas diferentes, independentemente da quebra de máquinas ocorrer ou não.

Slack (1983 e 1987) afirma que a flexibilidade de manufatura é descrita pela amplitude dos estados que um sistema pode assumir, pelo tempo necessário para se mover de um estado para outro, pela ruptura organizacional gerada e pelos custos para efetuar a mudança entre os estados. Tempo e custo são chamados de elementos de atrito que restringem

a resposta do sistema. Um sistema produtivo no qual o volume de produção varia muito deve ser flexível. Entretanto, ele pode ser menos flexível que um segundo, se o segundo obtiver a mesma variação de volume num período de tempo menor, com um custo menor. A flexibilidade de amplitude diz respeito ao nível e tamanho de adaptação de um sistema, o que está relacionado com sua capacidade. Já a flexibilidade de resposta está associada à taxa ou à facilidade de adaptação de um sistema, enfocando custo, tempo, ou ambos. Segundo Slack (1987), a flexibilidade total de um sistema de manufatura é composta pela flexibilidade dos indivíduos e dos recursos de infra-estrutura, que por sua vez é composta pela tecnologia, pela força de trabalho e pela própria infra-estrutura.

Carter (1986) *apud* Parker e Wirth (1999) sugerem que alguns tipos de flexibilidade de manufatura influenciam o sistema e o ambiente em blocos de tempo diferentes, ou seja, no curto, médio ou longo prazo. Carlsson (1992) insere os termos estático e dinâmico à flexibilidade de manufatura. A flexibilidade estática se refere à habilidade de lidar com as mudanças que podem ser previstas como, por exemplo, quebra de máquinas, flutuações na demanda e queda nas vendas. A flexibilidade dinâmica se refere à habilidade de lidar com os eventos que não podem ser previstos como, por exemplo, novas idéias, novos produtos e novos tipos de competidores. Complementarmente, De Toni e Tonchia (1998) afirmam que a distinção entre flexibilidade dinâmica e estática também pode ser realizada ao observar-se os meios de obtê-las. A primeira é obtida através de tecnologia, enquanto a segunda é obtida através de ações gerenciais ou organizacionais.

Complementarmente a estas dimensões anteriormente apresentadas, também se pode enfocar a flexibilidade de manufatura no aspecto estratégico (SWAMIDASS E NEWELL, 1987; GERWIN, 1993; ETTLIE E PENNER-HAHN, 1994; WARD *et al.*, 1995; SAFIZADEH *et al.*, 1996; VICKERY *et al.*, 1997; NARAIN *et al.*, 2000; KAHYAOGLU *et al.*, 2002; BOYLE, 2006). Swamidass e Newell (1987) afirmam que a estratégia é um conjunto de ações realizadas ou pretendidas com o propósito de atingir metas. Tomando como base ações em direção ao aumento da flexibilidade, Gerwin (1993) afirma que as mesmas não devem ser apenas uma resposta adaptativa às incertezas ambientais. Ao se adotar uma posição pró-ativa, pode-se criar incertezas com as quais os competidores não poderão lidar, gerando benefícios próprios. Para tal, o autor desenvolve um modelo com quatro fases para implementar mudanças necessárias e alcançar a flexibilidade; são elas: (i) identificar os aspectos da flexibilidade que são importantes para competir, (ii) medir localmente os níveis necessários, potenciais e reais para cada aspecto, (iii) identificar métodos para reduzir,

melhorar, alterar, adaptar cada aspecto e (iv) avaliar continuamente a direção quanto à flexibilidade requerida. O esquema na Figura 3 apresenta a relação entre as quatro fases.

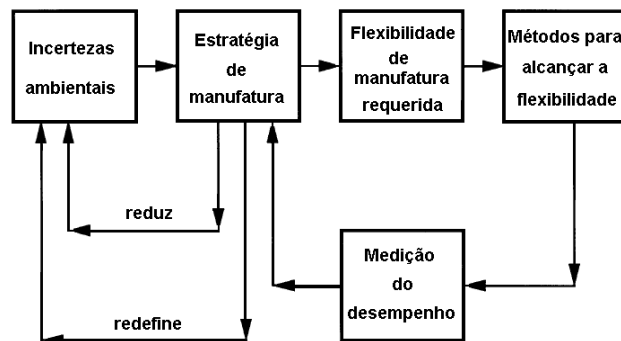


Figura 3: Modelo conceitual para alcançar a flexibilidade de manufatura

Fonte: Gerwin (1993)

Sob outra perspectiva, ao se definir a estratégia da manufatura, que tem relação com as mudanças externas, também se deveria pensar nos tipos de flexibilidades internas, ou seja, aquelas que o sistema e os componentes deveriam possuir. Certas flexibilidades, como a de produto, de volume, de produção e de expansão têm implicações estratégicas; outras, como de processo, de programação, de roteamento e de máquinas, têm implicações operacionais (LIM, 1987; DA SILVEIRA, 1998; VICKERY *et al.*, 1997; SETHI E SETHI, 1990).

Segundo Slack (1988) *apud* Gerwin (1993), a determinação da estratégia de manufatura envolve a priorização das necessidades de produtividade, da disponibilidade de produtos e da fidelidade aos produtos. A importância dos vários tipos de flexibilidade de manufatura é determinada pela análise de como cada uma contribui na priorização das necessidades, guiando a seleção dos vários recursos tecnológicos.

Suarez *et al.* (1995) definem um modelo com variáveis representando a incerteza do mercado e os imperativos estratégicos que agem sobre a empresa (eficiência, qualidade e flexibilidade). Para estes autores, todos os tipos de flexibilidade são variantes de quatro tipos básicos encontrados: *mix*, novos produtos, volume e tempo de entrega. Os fatores que afetam a implementação da flexibilidade são a tecnologia da produção, as técnicas de gerenciamento da produção, relacionamento com subcontratados e fornecedores, gerenciamento dos recursos humanos e desenvolvimento de novos produtos.

Os trabalhos de Upton (1994, 1995) resumam todos os conceitos discutidos até este ponto e trazem a definição de flexibilidade de manufatura adotada neste trabalho. Adicionalmente, alguma das dimensões apresentadas na Tabela 2 pode ficar evidenciada em uma situação ou outra. Para o autor, flexibilidade é a habilidade de mudar ou de reagir com

pouca penalidade em tempo, esforços, custos e desempenho. Ainda segundo o autor, o primeiro passo é definir com clareza o que deve ser mudado e avaliar que diferentes flexibilidades estão implicadas. O segundo passo é determinar com que frequência as mudanças ou adaptações devem ocorrer. Existem algumas que ocorrem apenas esporadicamente, de períodos em períodos, enquanto outras precisam ser constantemente efetuadas. Carlsson (1989) *apud* Upton (1994) utiliza os termos operacional, tático e estratégico para definir mudanças que ocorrem muito frequentemente e com menor grau de esforço, esporadicamente e raramente (longo prazo, maior esforço e maior investimento de capital), respectivamente. O terceiro passo é determinar quais os elementos da flexibilidade serão requeridos, seu grau e sua disponibilidade.

Detalhando a definição de Upton (1994, 1995, 1997), existem três elementos distintos ou maneiras de ser flexível dentro de um período: *i*) amplitude (ou faixa), *ii*) mobilidade e *iii*) uniformidade. A amplitude se refere à habilidade de acomodar uma grande variedade de mudanças. Pode ser representada pelo número de alternativas viáveis ou alguma outra métrica que diferencie as opções disponíveis. Observa-se que, quanto maior a amplitude, maior o grau de opções que podem ser acomodadas ou efetivadas. A mobilidade se refere às penalizações sofridas durante a transição/mudança; vista por outro lado, se está avaliando a facilidade de efetuar a mudança. Estas penalizações podem incluir tempo e custo da perda de produção, esforços gerenciais para realizar a reprogramação, refugos e retrabalho atribuídos à transição/mudança (SLACK, 1983; GERWIN, 1987; SETHI E SETHI, 1990; GUPTA E SOMERS, 1992; UPTON, 1994, 1995). A uniformidade se refere à habilidade do sistema de permanecer constante no desempenho, ao longo de todas as mudanças (em toda a amplitude de variação). Estas medidas de desempenho incluem, mas não são as únicas, eficiência, produtividade, qualidade, tempo de processamento ou custo dos produtos.

Para Beach *et al.* (2000), o conceito de flexibilidade de manufatura ainda pode ser aperfeiçoado, porém as definições encontradas na literatura enfocam três pontos importantes: elas refletem a amplitude e a diversidade de compreensão do objeto, a habilidade de resposta às mudanças e são a resposta às incertezas do mercado e do ambiente.

2.1.2 Classificação da flexibilidade de manufatura

Realizar a classificação dos diferentes tipos de flexibilidade de manufatura não é uma tarefa trivial. Gupta e Buzacott (1989) argumentam que, embora a literatura sobre flexibilidade de manufatura (FM) seja rica e recorrente, não existe consenso sua forma de

realizar a sua classificação. Embora muitos autores já a tenham efetuado, sob a perspectiva da academia ainda se tem dificuldades de obter um modelo unitário e unívoco, que contemple todos os aspectos da flexibilidade de manufatura, que os diferencie claramente e que seja lógico (SETHI e SETHI, 1990; DE TONI E TONCHIA, 1998). Da mesma forma, sob a perspectiva dos gerentes e supervisores, observa-se que estes não diferenciam alguns tipos de flexibilidade e desconhecem totalmente outras (SLACK, 1987; LIM, 1987).

Na proposta de De Toni e Tonchia (1998), embasada em diferentes autores, a classificação da flexibilidade de manufatura é organizada em cinco abordagens: *i*) horizontal ou por fases; *ii*) vertical ou hierárquica; *iii*) temporal; *iv*) pelo objeto que está sofrendo a variação; e *v*) mista.

Na abordagem horizontal da flexibilidade observam-se os estágios isolados da manufatura, mas guiados sob a ótica da cadeia de valor (desde o projeto ou a compra até a a distribuição ou o serviço ao consumidor). Mais simplesmente, está se distinguindo entre flexibilidade interna (projeto de produto ou de processo e produção) e flexibilidade externa (comercialização e distribuição). Esta abordagem também pode ser estendida para avaliar a flexibilidade dos fornecedores e dos serviços aos consumidores.

Na abordagem vertical da flexibilidade existe a preocupação com o grau de detalhamento do objeto analisado. A flexibilidade pode ser estimada em relação a apenas uma fonte de recursos do sistema (nível micro) ou ao sistema inteiro (nível macro). Alguns exemplos do sistema micro são os recursos, as máquinas, os trabalhadores, o sistema de movimentação de materiais, entre outros. Alguns exemplos do sistema macro são os sistemas de produção, as variáveis agregadas (por exemplo, a programação, que depende do processo e do roteamento), a empresa como um todo e sua rede (corporação), entre outros.

Na abordagem temporal da flexibilidade se procura avaliá-la ao longo de diferentes intervalos de tempo. Pode-se, por exemplo, considerar a capacidade de adaptabilidade da produção (característica de curto prazo) ou a adequação do projeto (característica de médio - longo prazo). A literatura ainda cita características instantâneas, de muito curto prazo, de curto - médio prazo, de médio prazo e de longo prazo. Segundo Gupta e Buzacot (1989), as melhorias nos aspectos de flexibilidade de curto e médio prazo têm maior chance de sucesso, pois as medidas a longo prazo dependem de decisões gerenciais, são mais complexas, têm impacto em toda a organização e podem dispendir maior aporte de capital.

A abordagem da flexibilidade de acordo com objeto de variação é a mais comumente encontrada na literatura e tem em Gerwin (1987 e 1993), Browne *et al.* (1984), Sethi e Sethi (1990), Suarez *et al.* (1995) alguns de seus proponentes. Alguns exemplos de objetos são o

produto, o processo, os materiais, o volume, a expansão, o roteamento, entre outros; tais objetos serão detalhados posteriormente, denominando-os de ‘tipos’.

Finalmente, na abordagem mista se verificam lógicas aditivas; por exemplo, considerando o tempo e o objeto de variação, ou considerando o objeto de variação dentro de uma hierarquia (vertical). Neste trabalho será adotada a abordagem da flexibilidade de manufatura segundo o objeto de variação, utilizando alguma forma de hierarquia num momento posterior.

Observa-se que existe uma diversidade de formas para classificar os diferentes objetos de variação (tipos) da flexibilidade de manufatura. A classificação, como se conhece hoje, evoluiu ao longo dos anos. Para Mandelbaum (1978) *apud* Gupta e Goyal (1989) e Zelenovic (1982), a definição de flexibilidade de manufatura e sua classificação não são distintas e pode-se realizar um paralelo subjetivo entre a definição apresentada e os objetos a que fazem referência. Buzacot (1982) inicia a classificação por tipos quando define flexibilidade *job* e flexibilidade das máquinas. A flexibilidade *job* é a habilidade que o sistema tem de lidar com mudanças nas ordens de produção/serviço futuras. A flexibilidade das máquinas é a habilidade de lidar com mudanças e distúrbios nas máquinas e estações de trabalho.

Gerwin (1982) menciona alguns tipos de maneira específica e, em trabalhos posteriores (GERWIN, 1987 e 1993), relaciona-as as incertezas que as causam, conforme pode ser visto na Tabela 3.

Tabela 3: Associação dos tipos de flexibilidade de manufatura e incerteza

Tipo de flexibilidade	Incerteza com respeito à
<i>Mix</i>	Aceitação dos produtos pelos consumidores
Produto	Tamanho do ciclo de vida dos produtos
Modificação	Atributos valorizados pelos consumidores
Roteamento	Tempo de quebra das máquinas
Volume	Quantidade demandada pelos consumidores
Material	Padronização das matérias primas
Programação	Tempo de entrega das matérias primas

Fonte: Gerwin (1987 e 1993)

Slack (1983 e 1987) define cinco tipos para a flexibilidade de manufatura que são novos produtos, *mix* de produtos, qualidade, volume e entrega. A flexibilidade da qualidade não é um tipo comumente observado por outros autores, tanto que Slack (1987) também não a utiliza mais. Gustavsson (1984) identifica três tipos específicos, que são a demanda, o produto e as máquinas. Sugere que seja feita uma análise estratégica para decidir entre obter flexibilidade ou produtividade.

Browne *et al.* (1984) definem e descrevem oito tipos de flexibilidade de manufatura, conforme pode ser observado na Tabela 4. Lim (1987) realiza uma pesquisa com 26 empresas que, dentre outros objetivos, visa compreender o significado que se tem da flexibilidade de manufatura. Observa-se um entendimento bem menos amplo do que aquele proposto por Browne *et al.*(1984): quase todas interpretam a flexibilidade de manufatura como sendo apenas sinônimo de flexibilidade de produto. Em segundo lugar aparece a flexibilidade das máquinas (pois algumas usam centros de máquinas CNC) e do volume. A flexibilidade das operações, de expansão, de adaptabilidade do trabalhador a diferentes tarefas e de ajuste a diferentes operações não foram citadas.

Tabela 4: Classificação dos tipos de flexibilidade de manufatura

Tipo de flexibilidade	Definição
Máquinas	Facilidade de realizar as modificações necessárias para produzir um determinado conjunto de peças
Processo	Habilidade de produzir um determinado conjunto de peças, utilizando diferentes materiais e diferentes maneiras
Produto	Habilidade de produzir novos produtos de forma econômica e rápida
Roteamento	Habilidade de contornar as quebras e continuar a produzir um conjunto de peças
Volume	Habilidade de operar lucrativamente em diferentes volumes/ níveis de produção
Expansão	Capacidade de construir um sistema, expandi-lo se necessário, de forma fácil e modular
Operações	Habilidade de alterar o ordenamento das operações para cada peça
Produção	Universo dos tipos de peças que um sistema pode produzir

Fonte: Browne *et al.* (1984)

O fator humano é um componente essencial da flexibilidade e um elemento chave na seleção, desenvolvimento, melhoria e implementação da mesma (PINFIELD E ATKINSON, 1988; KARA E KAYIS, 2004; OLHAGER, 1993; SUAREZ *et al.*, 1995). A tecnologia flexível não pode ser totalmente efetiva sem a força de trabalho, e vice-versa (SLACK, 1987). Para Chang (2004), a flexibilidade da força de trabalho pode ser definida como a habilidade de um trabalhador realizar operações variadas, complexas, não estruturadas e não padronizadas. Um estudo de Suresh e Gaalman (2000) analisa fatores relacionados ao trabalho quando o *layout* é convertido de funcional para celular, aumentando a flexibilidade requerida. Segundo os autores, num primeiro momento e sem treinamento, o desempenho dos trabalhadores no *layout* celular é menor, mas poderia ser aumentado se fossem enfocados redução dos níveis de *setup* (preparação das máquinas), emprego de lotes de produção menores, níveis moderados de treinamento cruzado e determinação mais efetiva da operação e da programação. Entretanto, existem diversos tipos de flexibilidade que tornam esta relação do trabalhador com o desempenho passível de ser investigada sistematicamente através de experimentos controlados, providenciando condições realísticas de dados, validação analítica e modelos de simulação. De acordo com Karuppan e Ganster (2004), por causa da facilidade e

do baixo custo em desenvolver habilidades na força de trabalho, de forma geral, aumentar o número de operadores é a primeira escolha de um gerente para melhorar qualidade, velocidade e flexibilidade.

Sethi e Sethi (1990), Barad e Nof (1997) apresentam três subdivisões para os tipos de flexibilidade: *i)* de componentes ou básica; *ii)* do sistema; e *iii)* agregada, conforme pode ser observado na Tabela 5. A flexibilidade de componentes contribui para a flexibilidade do sistema, que por sua vez influencia a flexibilidade agregada. Segundo Hassan (1994), as dificuldades de encontrar soluções para os problemas das máquinas e do sistema de movimentação de materiais são anteriores às outras decisões e impactam nas escolhas seguintes.

Narain *et al.* (2000) propõem classificar a flexibilidade em três níveis: flexibilidade necessária (foco operacional), flexibilidade suficiente (foco tático) e flexibilidade competitiva (foco estratégico). Os elementos constituintes do primeiro grupo seriam a flexibilidade das máquinas, do produto, da força de trabalho, do sistema de movimentação, do roteamento e do volume. Os elementos constituintes do segundo grupo seriam a flexibilidade do *mix*, das operações, da programação e dos materiais. Os elementos constituintes do terceiro grupo seriam a flexibilidade de produção, de expansão e de mercado. Segundo os autores, a ordem temporal de flexibilidade almejada deveria progredir do primeiro até o terceiro grupo.

Tabela 5: Ligações entre os diferentes tipos de flexibilidade de manufatura

Componentes	Sistema	Agregada
Máquina	Processo (<i>mix</i>)	Processo + Roteamento = Programação
Sistema de movimentação	Roteamento	Processo + Roteamento + Produto = Produção
Operações	Produto	Produto + Volume + Expansão = Mercado
	Volume	
	Expansão	

Fonte: Sethi e Sethi (1990)

Sethi e Sethi (1990) seguem a definição de Browne *et al.* (1984) para quase todos os tipos de flexibilidade, divergindo apenas na definição de flexibilidade das máquinas. Segundo os autores, essa é definida pelos vários tipos de operações que uma máquina pode executar sem requerer esforços proibitivos para mudar de uma operação para outra. Além disso, a definição de flexibilidade de roteamento de Sethi e Sethi (1990) é similar, mas não igual à de Browne *et al.* (1984). Segundo eles, a flexibilidade de roteamento é a habilidade para produzir uma peça através de rotas alternativas no sistema. De acordo com Nagarur (1992) a flexibilidade de roteamento depende do tipo de processamento, de operações, das máquinas, do arranjo das máquinas e do investimento que se quer fazer. Além dos oito tipos de

flexibilidade que Browne *et al.* (1984) já haviam definido, Sethi e Sethi (1990) acrescentam a flexibilidade do sistema de movimentação, de programação e de mercado.

Na seqüência, são apresentadas algumas lógicas hierárquicas que sugerem agrupamentos de tipos de flexibilidade, as quais podem ser utilizadas para agrupamento de indicadores. Suspeita-se que estes agrupamentos, tenham um efeito semelhante sobre o desempenho final de uma instalação. Hyun e Ahn (1992) propõem um modelo unificado o qual pode ser mais bem entendido sob a perspectiva gerencial, e que pode ser observado na Figura 4.

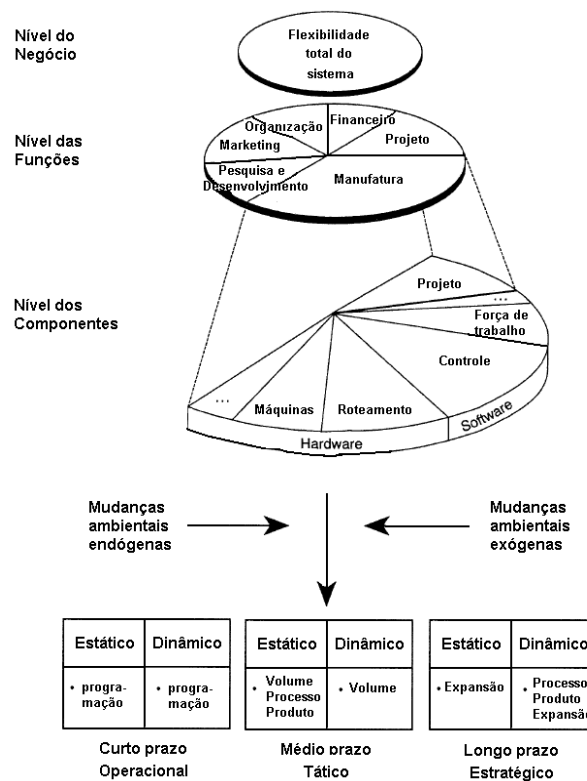


Figura 4: Modelo unificado de flexibilidade de manufatura
Fonte: Hyun e Ahn (1992)

Neste modelo, os autores unificam as definições de flexibilidade de manufatura sob três perspectivas: a do sistema, a dos elementos associados ao ambiente e a da tomada de decisão. Os três primeiros níveis (do negócio, da função e dos componentes) representam a perspectiva do sistema. A flexibilidade total do sistema é observada no nível do negócio que a empresa está inserida. No nível das funções, observa-se que a flexibilidade de manufatura é um membro, juntamente com a flexibilidade da organização, do projeto, do marketing, entre outros, deste nível. Ela, por sua vez, resulta na integração de diversos componentes (outro nível), como máquinas, roteamento, força de trabalho, controle, entre outros, que, por sua vez, são agrupados em *hardware* (ligado ao equipamento) e *software* (ligado ao fator humano). A

perspectiva dos elementos associados ao ambiente está relacionada com as características externas e internas que cercam as atividades de manufatura que, por sua vez, podem ser estáticas, pois têm relação com tecnologia de processo, ou dinâmicas, pois têm relação com cultura organizacional. Nesta perspectiva está incluída a flexibilidade de expansão, de produto, de *mix*, de volume e de programação. A perspectiva da tomada de decisão está relacionada a decisões de longo prazo/estratégico, médio prazo/tático e curto prazo/operacional. De acordo com os autores, todas as decisões tomadas num ambiente de incerteza dependem do ambiente interno e externo da empresa, e de sua posição reativa ou proativa.

Na mesma lógica, o modelo de Koste e Malhotra (1999), que pode ser observado na Figura 5, também agrupa alguns tipos de flexibilidade de manufatura. Este modelo apresenta maior número de tipos de flexibilidade as quais, de acordo com os autores, são definidas em relação à amplitude (número e heterogeneidade), mobilidade e uniformidade e podem ser agrupados em cinco níveis – do negócio, das funções, da planta, do chão-de-fábrica e dos recursos individuais. Koste e Malhotra (1999 e 2000) e Koste *et al.* (2004) subdividiram o elemento amplitude, anteriormente classificado por Slack (1993 e 1987) e Upton (1994) como unitário. Segundo eles, ao se focar amplitude em relação a número, se está representando o número de opções possíveis. Ao se focar amplitude em relação à heterogeneidade da amplitude, se está representando o grau de diferenciação entre recursos/opções. Além disso, o modelo tem a forma de um cone invertido, que representa o aumento de capacidade à medida que se melhora a flexibilidade. De acordo com os autores, o modelo hierárquico dentro dos níveis, o qual não foi desenvolvido, deve ser similar.

As definições e os tipos de flexibilidade de manufatura a serem adotadas neste trabalho são apresentados na Tabela 6. Entre parênteses se observa a nomenclatura que pode ser encontrada como sinônimo do tipo de flexibilidade de manufatura na literatura. Segundo a classificação de De Toni e Tonchia (1998), no modelo proposto no Capítulo 3 um dos fatores primários, o de associação com outros tipos de flexibilidade de manufatura, é embasado em tipos de flexibilidade de manufatura. Não se optou por uma lógica de agrupamento ou de hierarquização, pois em termos práticos, pode haver benefício em medir cada tipo separadamente.

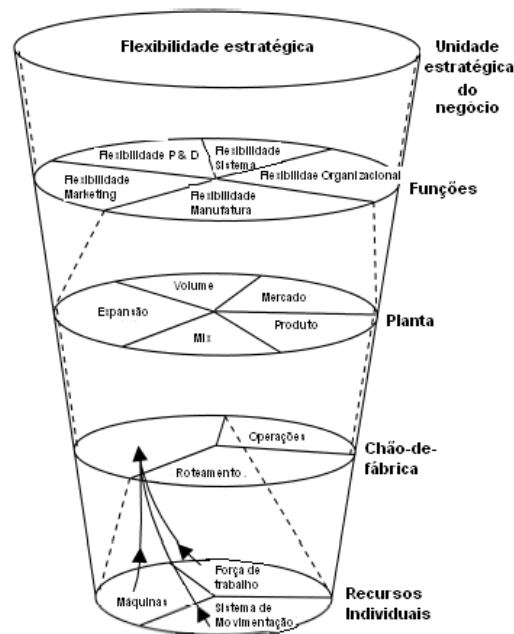


Figura 5: Modelo hierárquico dos tipos de flexibilidade de manufatura
 Fonte: Koste e Malhotra (1999)

Por fim, mesmo que não de modo tradicional, alguns autores, como Webster e Tyberghein (1980), Hassan (1994), Benjaafar e Ramakrishnan (1996) e Yang e Peters (1998) definem a flexibilidade de *layout*. Segundo Webster e Tyberghein (1980), a flexibilidade de *layout* é a habilidade do *layout* de responder a variações presentes e futuras no *mix* de produtos. Para os autores, o *layout* mais flexível é aquele com menores custos de movimentação de materiais considerando o cenário das demandas. Hassan (1994) define a flexibilidade de *layout* como a capacidade do mesmo se adaptar a mudanças que podem ocorrer no tempo de produção do *mix*, no volume demandado e no roteamento sem alterar o arranjo do *layout*. Para Benjaafar e Ramakrishnan (1996), a flexibilidade do *layout* compreende um dos tipos de flexibilidade do processo, juntamente com a flexibilidade do *mix*, de volume, de componentes e a do processador. A flexibilidade do processo é uma característica do mesmo e se refere à sua capacidade de ajuste às condições operacionais e/ou assumir funções diferentes (multi-objetividade). Para Yang e Peters (1998), a flexibilidade de um *layout* pode ser expressa de duas maneiras: a primeira pela robustez do desempenho em custo ao variar a demanda da produção e; a segunda pela adaptabilidade da instalação às necessidades futuras da produção.

Tabela 6: Definições de tipos de flexibilidade de manufatura adotadas

Tipo de flexibilidade (sinônimos)	Definição
Máquinas	Variedade de operações que uma máquina pode executar sem esforços proibitivos para mudar de uma operação a outra (SETHI E SETHI, 1990)
Força de trabalho (numérica, funcional, financeira, grupo de trabalho)	Habilidade do operador realizar operações variadas, complexas, não estruturadas e não padronizadas (CHANG, 2004). Amplitude de tarefas que um operador pode executar num sistema de manufatura (SLACK, 1983)
Sistema de movimentação	Habilidade de mover eficientemente diferentes peças ao longo do processo, por diferentes posições e por diferentes máquinas (SETHI E SETHI, 1990; BARAD E NOF, 1997; RAMASESH E JAYAKUMAR, 1991)
Roteamento (seqüenciamento)	Habilidade de produzir uma peça utilizando rotas alternativas, ou seja, diferentes máquinas, diferentes operações ou diferentes seqüências de operações (SETHI E SETHI, 1990; BARAD E NOF, 1997; PARKER & WIRTH, 1999)
Operações	Habilidade de produzir uma peça através de seqüência de operações alternativas (mudança ou alteração de operações) (SETHI E SETHI, 1990)
Expansão	Facilidade de adicionar capacidade ao sistema (BROWNE <i>ET AL.</i> , 1994; BARAD E NOF, 1997)
Volume	Habilidade de operar lucrativamente em diferentes níveis de produção (BROWNE <i>ET AL.</i> , 1994)
Produção	Universo de produtos que o sistema pode produzir sem adicionar novos equipamentos (SETHI E SETHI, 1990). Produzir economicamente um conjunto de peças (GUPTA E GOYAL, 1989)
<i>Mix</i> (processo, <i>job</i> , variante, saída, curto prazo)	Variedade de peças que podem ser processadas dentro de um <i>mix</i> , sem esforços proibitivos de <i>setup</i> (BARAD E NOF, 1997; SETHI E SETHI, 1990)
Produto (comutação, projeto, peças, novos produtos)	Facilidade com que novas peças podem ser adicionadas ou substituídas as existentes, envolvendo algum tipo de <i>setup</i> novo (SETHI E SETHI, 1990)
Mercado (modificação)	Facilidade com que o sistema de manufatura se adapta as modificações do mercado (SETHI E SETHI, 1990). Habilidade de encontrar as necessidades do cliente através da modificação dos produtos existentes (DIXON, 1992)
Programação	Tempo que o sistema pode operar desatendido (SETHI E SETHI, 1990). Operar desatendido significa operar sem intervenção humana, sob controle automático (BARAD E NOF, 1997)
Entrega	Habilidade do sistema de aumentar ou diminuir os tempos de entrega, conforme solicitação do cliente (SLACK, 1983)
Material (entrada, fator)	Habilidade de produzir peças de diferentes composições de matérias primas e dimensões. Capacidade de ter mais que uma substância para o mesmo/ diferente componente (GERWIN, 1987)

Fonte: elaborado pela autora (2009)

Outras abordagens sobre a flexibilidade de *layout*, denominados de ***layouts em ambientes dinâmicos*** podem ser observadas na seção 2.4.

2.1.3 *Medição da flexibilidade de manufatura*

Para melhorar a flexibilidade da manufatura é importante medi-la, identificar as áreas que requerem maior atenção e fornecer os recursos para as mesmas (BATEMAN *et al.*, 1999; KARA e KAYIS, 2004). Segundo Ramasesh e Jayakumar (1991), a medição correta da flexibilidade é importante, pois auxilia na tomada de decisões. Entretanto, segundo estes autores, qualquer tentativa de medir a flexibilidade deve inicialmente responder a duas perguntas: para que tipo de mudanças se deseja obter flexibilidade e qual o horizonte de tempo ou o intervalo de medição apropriado. Complementarmente, Parker e Wirth (1999) defendem que, antes de propor formas de medir a flexibilidade de manufatura, deve-se estabelecer o propósito destas medidas e os critérios de julgamento que serão adotados. Também não se pode esquecer que, ao iniciar o processo de quantificação da flexibilidade de manufatura, tem-se três opções: *i*) medir a mudança gerada no ambiente; *ii*) medir a mudança no desempenho do sistema; ou *iii*) medir a mudança gerada no estado da instalação (DAS, 1996). Segundo o autor, como mudanças ambientais acontecem independentemente da flexibilidade, apenas importam as duas últimas opções.

Cox (1989) afirma que é necessário desenvolver uma forma conceitual e operacional de medir a flexibilidade de uma manufatura. Idealmente, esta medida deveria ser direta e fácil de realizar, gerar um indicador significativo, compreensivo e particular das capacidades que estão sendo representadas e ser aplicada a diferentes instalações com diferentes de produtos. Tsourveloudis e Phillis (1998) ainda acrescentam que as medições deveriam focar nos tipos básicos de flexibilidade (menos complexos) e incorporar o conhecimento humano acumulado.

Segundo Gerwin (1993), existem quatro abordagens distintas para a questão da mensuração da flexibilidade. A primeira avalia a flexibilidade como um problema de análise de decisões, na qual as opções futuras são afetadas pelas escolhas tomadas no presente. Mandelbaum e Buzacott (1990) utilizam esta abordagem num cenário composto por dois períodos consecutivos e medem a flexibilidade em termos do número de opções possíveis, em circunstâncias bem estabelecidas, mas não sob todas as possibilidades. Quando se desenvolve um modelo de decisão de uma situação que envolve escolhas, concomitantemente também se está desenvolvendo a descrição do processo ou da situação, um plano de ação, a probabilidade de distribuição dos estados, os critérios e as perdas de utilização. Geralmente, o modelo não é completamente verdadeiro, podendo ser uma representação incompleta da realidade, principalmente quando os dados não são independentes e identicamente distribuídos.

Uma segunda abordagem consiste em determinar o número total de opções disponíveis em um determinado período de tempo como, por exemplo, o número de produtos no *mix*.

A terceira abordagem baseia-se nas características físicas de um determinado sistema de manufatura. Gupta e Buzacott (1989) contrapõem que a flexibilidade não pode ser medida só através de características físicas, pois, de fato ela é uma combinação das características físicas, das políticas operacionais e das práticas gerenciais.

A última abordagem relaciona a flexibilidade com impactos econômicos, como valor ou custo. Sobre o relacionamento da flexibilidade com impactos econômicos, Gupta e Buzacott (1989) contrapõem que geralmente não se diferencia entre sensibilidade, estabilidade e aspectos relacionados ao desempenho. Segundo os autores, a sensibilidade observa se uma resposta é necessária ou não e a estabilidade avalia se um sistema é capaz de responder ou não, dado que se necessita de uma resposta.

De Toni e Tonchia (1998) enfocam a questão da medição da flexibilidade de manufatura de forma diferente. Segundo eles, alguns tipos de flexibilidade de manufatura podem ser medidos de forma direta, outros de forma indireta e ainda outros de forma sintética. A medição de forma direta é realizada quando se avaliam as opções possíveis num certo instante em termos quantitativos ou probabilísticos, quando se analisa a variedade das saídas possíveis ou quando se analisa de forma subjetiva o grau de concordância/discordância de algum aspecto relativo da flexibilidade. A medição de forma indireta é realizada quando se mede alguma característica do sistema que estimule o aumento da flexibilidade de manufatura (como, por exemplo, tecnologia ou organização gerencial) ou quando se avaliam indicadores de desempenho relacionados à flexibilidade (como, por exemplo, custos, tempo de desenvolvimento de produtos, tempo de entrega, qualidade, entre outros). Finalmente, como existem diferentes tipos de flexibilidade de manufatura e como só podem ser realizadas medidas parciais da mesma, num segundo momento deve ser realizada uma síntese para obter um indicador agregado que leve as diferenças em consideração. Por exemplo, um indicador agregado para a flexibilidade de máquina é a produtividade.

Segundo Gerwin (1993), as dificuldades para operacionalizar as medidas de flexibilidade são as seguintes: *i*) falta de critérios para classificar os tipos de flexibilidade; *ii*) falta de escalas adequadas para teste e coleta de dados devido à multidimensionalidade da flexibilidade; *iii*) dificuldade de generalização dos resultados devido às diferentes e variadas hierarquias encontradas; *iv*) dificuldade de generalização dos resultados devido à aplicação

em diferentes segmentos industriais; e v) falta de comunicação entre os estudiosos que formulam hipóteses e teorias, e aqueles que desenvolvem escalas empíricas.

Gupta e Buzacott (1989) argumentam que é improvável que exista uma medida única para medir a flexibilidade. Segundo eles, não existe uma correspondência de um-para-um entre flexibilidade e atributos físicos, visto que a organização e os mecanismos de controle também têm um papel importante. Além disso, deve-se levar em conta que medir um aspecto (sensitividade ou estabilidade) e focar apenas uma característica pode levar a conclusões errôneas sobre um sistema de manufatura. Para minimizar essas dificuldades, Gupta (1993) e Gupta e Buzacott (1989) sugerem utilizar uma medida substituta chamada de *valor da flexibilidade de manufatura*. O valor da flexibilidade de manufatura é inversamente proporcional à flexibilidade real da empresa frente às suas necessidades. Por exemplo, quando o valor da flexibilidade é alto, a flexibilidade da empresa é baixa comparada com os níveis desejáveis para operação da mesma, e vice-versa. Depende de fatores como frequência relativa de ocorrência das mudanças, da redução do impacto da mudança e das propriedades físicas do sistema. De acordo com os autores, a medição do valor da flexibilidade de manufatura acontece através dos seguintes passos: *i)* desenvolver uma listagem dos objetivos da flexibilidade; *ii)* determinar o tipo de mudança; *iii)* identificar os componentes que serão afetados (pessoas, unidade de produção e sistema de informação e controle); *iv-1)* desenvolver modelos de avaliação do desempenho no curto prazo; *iv-2)* desenvolver modelos agregados de comparação da estabilidade e da sensitividade no médio prazo; *iv-3)* desenvolver modelos de decisão para gerência no longo prazo; *v)* determinar a probabilidade de ocorrência das mudanças; e *vi)* repetir os passos *i)* a *v)* até que todos os tipos de mudanças sejam considerados.

Suarez *et al.* (1995) afirmam que diferentes tipos de flexibilidade requerem diferentes configurações de fatores, por isso é muito difícil encontrar uma planta flexível em todas as dimensões. Algumas instalações podem ser muito flexíveis em algum aspecto e pouco flexíveis em outros, sendo este fato determinado por restrições tecnológicas, relacionamento com fornecedores, processo de desenvolvimento de produtos, gerenciamento de recursos humanos, necessidades do ambiente ou escolhas gerenciais.

A literatura de avaliação da flexibilidade de manufatura pode ser dividida em dois grupos: um que utiliza medidas qualitativas e outro que utiliza medidas quantitativas. As medidas qualitativas enfocam fatores subjetivos que influenciam a flexibilidade do sistema. As medidas quantitativas apresentam diversos modelos matemáticos que medem a flexibilidade do componente, máquina ou do sistema.

Numa pesquisa qualitativa, Swamidass e Newell (1987) solicitaram que alguns gerentes avaliassem onze itens relevantes para a flexibilidade; a saber: introdução de novos produtos, introdução de novos processos, variedade de produtos, características de produto, pesquisa e desenvolvimento, uso dos produtos, alternativas de fornecimento, concorrência, controle e regulação do governo, políticas públicas e relacionamento com sindicatos. Os autores confirmaram o que se verifica na literatura sobre flexibilidade e incerteza, encontrando que, quanto maior a flexibilidade, melhor o desempenho de uma instalação. Verificaram também que, para lidar com as certezas impostas pelo ambiente, uma organização pode se beneficiar ao aumentar a flexibilidade de manufatura, fato já constatado na prática por empresas japonesas.

Na Tabela 7 são apresentados alguns indicadores encontrados na literatura para medir a flexibilidade de manufatura.

A seguir, são apresentados autores que abordaram a mensuração da flexibilidade de manufatura sob enfoque totalmente quantitativo. A formulação matemática utilizada pelos autores não será explicitada neste trabalho.

Barad (1992) utiliza simulação para verificar o efeito da mudança constante de *mix*, da disponibilidade de recursos e da variação do nível de utilização das máquinas nos sistemas em estudo. Benjaafar e Ramakrishnan (1996) modelam e medem a flexibilidade de roteamento sob condições de operação variáveis. Chen e Chung (1996) sugerem alternativas para medir a flexibilidade das máquinas (envolvendo *mix*, produto e operação) e do roteamento (envolvendo volume e expansão). Das (1996) propõe indicadores para medir a flexibilidade das máquinas, de roteamento, de *mix*, de produto e de volume.

Tsourveloudis e Phillis (1998) modelam a interferência humana no processo de atribuir valor aos diferentes tipos de flexibilidade de manufatura (máquina, roteamento, sistema de movimentação, produto, operações, *mix*, volume, expansão e força de trabalho). Os autores utilizam um processo baseado no conhecimento modelado pela lógica *fuzzy (if-then)*.

Shewchuk (1999) desenvolve um conjunto de medidas genéricas da flexibilidade de manufatura baseada na habilidade e no desempenho do processo e mostra exemplos de cálculo da flexibilidade de produto, roteamento, entrega, sistema de movimentação e de produção. Bateman, Stockton e Lawrence (1999) propõem a medição da flexibilidade de produto e de *mix*.

Tabela 7: Indicadores dos diferentes tipos de flexibilidade de manufatura

Tipo	Indicador
Máquinas	Número de operações diferentes realizadas por cada máquina (SETHI E SETHI, 1990) Extensão da variação nas entradas que uma máquina pode suportar (número de ferramentas e programas) (GERWIN, 1987) Tempo de <i>setup</i> (BROWNE <i>et al.</i> , 1984) Heterogeneidade de operações (KOSTE E MALHOTRA, 1999)
Força de trabalho (numérica, funcional, financeira, grupo de trabalho)	Nível de treinamento (TSOURVELOUDIS E PHILLIS, 1998) Rotatividade (TSOURVELOUDIS E PHILLIS, 1998) Facilidade de ser substituído (ATKINSON, 1985 <i>apud</i> CHANG, 2004) Número de tarefas que um operador pode realizar (ATKINSON, 1985 <i>apud</i> CHANG, 2004) Tempo necessário para um grupo de operadores resolver quebras e alterar roteamento (ATKINSON, 1985 <i>apud</i> CHANG, 2004) Número de máquinas que um operador pode operar (FELAN E PHILIPOOM, 1993 <i>apud</i> CHANG, 2004)
Sistema de movimentação	Caminhos que o sistema de movimentação pode fazer /todos os caminhos que o sistema de movimentação poderia fazer (SETHI E SETHI, 1990) Volume, dimensão e peso da carga (TSOURVELOUDIS E PHILLIS, 1998) Peso, geometria e frequência de transporte dos produtos (TSOURVELOUDIS E PHILLIS, 1998) Número de máquinas e <i>buffers</i> conectados (TSOURVELOUDIS E PHILLIS, 1998)
Roteamento	Número médio de modos que uma peça pode ser feita (SETHI E SETHI, 1990) Robustez do sistema quando acontecem quebras (BROWNE <i>et al.</i> , 1984) Entropia (KUMAR, 1987) Porcentagem gasta em tempo de atravessamento gerado pela quebra de máquinas (BUZACOTT, 1982) Custo da produção devido à reprogramação urgente de um trabalho (BROWNE <i>et al.</i> , 1984) Taxa dos caminhos existentes ligando as máquinas pelos que são possíveis (CARTER, 1986 <i>apud</i> PARKER E WITH, 1999)
Operações	Número de processos diferentes que podem ser aplicados na fabricação das peças (SETHI E SETHI, 1990)
Expansão	Custo de aumentar a capacidade (SETHI E SETHI, 1990) Tempo (esforço) necessário para aumentar a capacidade (SETHI E SETHI, 1990) Limite superior da capacidade (BROWNE <i>et al.</i> , 1984) Facilidade de adicionar novas máquinas ao sistema (TSOURVELOUDIS E PHILLIS, 1998)
Volume	Menor volume no qual o sistema ainda é rentável (SETHI E SETHI, 1990; BROWNE <i>et al.</i> , 1984) Taxa de volume médio de flutuações em relação a capacidade total (GERWIN, 1987)

Cont. Tabela 7: Indicadores dos diferentes tipos de flexibilidade de manufatura

Tipo	Indicador
Produção	Número de peças que um sistema é capaz de produzir (SETHI E SETHI, 1990) Nível da tecnologia existente (BROWNE <i>et al.</i> , 1984) Valor gerado pelo portfólio de produtos (JAICUMAR, 1984 <i>apud</i> RAMASESH E JAYAKUMAR, 1991)
Mix (processo, <i>job</i> , variante, saída, curto prazo)	Número de peças produzidas sem esforços proibitivos de <i>setup</i> (SETHI E SETHI, 1990; BROWNE <i>et al.</i> , 1984) Custo de <i>setup</i> (TSOURVELOUDIS E PHILLIS, 1998) Tempo para mudar de um <i>mix</i> de peças para outro (SETHI E SETHI, 1990; BROWNE <i>et al.</i> , 1984) Custo para mudar de um <i>mix</i> de peças para outro (SETHI E SETHI, 1990)
Produto (comutação, projeto, peças, novos produtos)	Número de novos produtos produzidos dentro de um período (JAICUMAR, 1984 <i>apud</i> RAMASESH E JAYAKUMAR, 1991) Tempo para mudar de um produto para outro (BROWNE <i>et al.</i> , 1984) Custo para mudar de um produto para outro (BROWNE <i>et al.</i> , 1984) Número de peças comuns usadas em produto final (TSOURVELOUDIS E PHILLIS, 1998)
Mercado (modificação)	Tempo para introduzir um novo produto no mercado, aumentar ou diminuir o volume de produção e aumentar sua capacidade (SETHI E SETHI, 1990) Custo para introduzir um novo produto no mercado, aumentar ou diminuir o volume de produção e aumentar sua capacidade (SETHI E SETHI, 1990)
Programação	Porcentagem de tempo gasto em segundo e terceiro turno operando na totalidade da capacidade (SETHI E SETHI, 1990)
Entrega	Tempo para reorganizar a produção e replanejar uma nova data de entrega (SLACK e CORREA, 1992) Extensão com que as datas de entregas podem ser antecipadas (SLACK e CORREA, 1992) <i>Lead time</i> de entrega (OLHAGER, 1993)
Material (entrada, fator)	Número de ajustes (identificação, adaptação ou correção) gerados para o processo (GERWIN, 1987) Variações dimensionais geradas pelos equipamentos (GERWIN, 1987) Variações das propriedades físicas geradas pelos equipamentos (GERWIN, 1987)

Fonte: elaborado pela autora (2009)

Baseado no trabalho de Browne *et al.* (1984), Parker e Wirth (1999) afirmam haver encontrado medidas aceitáveis na literatura para as flexibilidades de máquinas, *mix*, produto, roteamento e operação. Entretanto para as flexibilidades de volume e expansão, os autores tiveram que desenvolver modelos matemáticos de avaliação próprios. A medição da flexibilidade de produção através de modelos matemáticos não foi realizada por estes autores pois, segundo eles, ainda existem divergências se a mesma pode ser representada pelo somatório de todos os outros tipos de flexibilidade, e conseqüentemente sobre a importância relativa de cada tipo de flexibilidade e sobre a forma como estas flexibilidades estão relacionadas entre si.

Shewchuk e Moodie (2000) desenvolvem indicadores para medir a flexibilidade de produto, *mix*, produção e volume e simulam os *trade-offs* entre estes tipos de flexibilidade e diferentes tipos de ambientes. Oke (2003) desenvolve uma série de direcionadores para a flexibilidade de volume. Karuppan e Ganster (2004) verificam a influência da flexibilidade de máquinas e da força de trabalho na flexibilidade de *mix*. Wahab (2005) mede a flexibilidade das máquinas e do de produção levando em consideração um ambiente dinâmico. Pramod e Garg (2006) utilizam simulação para analisar a flexibilidade das máquinas, de volume e de variação do *mix* sob um ambiente de incerteza. Um diferencial do trabalho destes autores é que a simulação desenvolvida parte de verificar a utilização do sistema e o tempo de atravessamento para cinco configurações de *layouts* específicos e diferenciados. Wahab *et al.* (2008) medem a flexibilidade das máquinas levando em conta características de peças produzidas, número de operações, incerteza da demanda e indicadores operacionais como custo e tempo de *setup* e custo e tempo de processamento.

Outra ferramenta utilizada para medir a flexibilidade de manufatura é a análise fatorial. Gupta e Somers (1992) utilizam a análise fatorial para entender o relacionamento entre 34 itens relacionados aos tipos de flexibilidade de manufatura propostos por Sethi e Sethi (1990). Dixon (1992) também utiliza a análise fatorial para entender o relacionamento entre as diferentes características apresentadas por produtos de empresas têxteis, a fim de verificar a flexibilidade de *mix*, de novos produtos e de modificação. Segundo o autor, novos produtos são aqueles cujas características funcionais diferem dos produzidos anteriormente pela planta. Produtos modificados são aqueles cujas características funcionais são mantidas, mas algum aspecto de sua composição, cor ou material são alterados para satisfazer o consumidor. D'Souza e Williams (2000) realizam um estudo exploratório no qual também utilizam a análise fatorial para analisar a flexibilidade de volume, de produção, de *mix* e do sistema de movimentação e verificar indicadores relativos a amplitude e a mobilidade em cada caso. Koste *et al.* (2004) utilizam a análise fatorial para estabelecer indicadores para as flexibilidades de máquina, força de trabalho, sistema de movimentação, *mix*, produto e modificação (mercado). Para cada tipo de flexibilidade foram estabelecidos indicadores de amplitude' (número de opções), amplitude'' (heterogeneidade de opções), mobilidade e uniformidade.

Finalizando, segundo Upton (1994), a medição da flexibilidade da manufatura deve ser realizada com cautela, pois uma medida adequada para uma instalação industrial pode não ser representativa quando aplicada à outra. Para que uma medida tenha significado ela deve ser relacionada a um cenário, a um conjunto de referência (BRILL E MANDELBAUM,

1989). Além disso, devem-se definir precisamente os indicadores nos quais uma instalação será avaliada, para que futuramente se possam realizar comparações cruzadas sem problemas de escala e de correlações inesperadas. Tendo estes cuidados, Upton (1994) sugere que se desenvolva uma formulação geral para o problema, gerando um modelo que avalie precisamente diferentes empresas.

2.1.4 Correlações entre as diferentes flexibilidades de manufatura

Segundo Koste e Malhotra (1999), na maioria das vezes, os tipos de flexibilidade de manufatura têm sido discutidos de forma individual, sem levar em conta os inter-relacionamentos existentes. Entretanto, para autores como Gupta e Goyal (1992), Suarez *et al.* (1995), Parker e Wirth (1999), o desafio real tem sido estudar o relacionamento e as relações de custo-benefício entre os diferentes tipos de flexibilidade de manufatura.

Browne *et al.* (1984) afirmam que nem todos os tipos de flexibilidade de manufatura são independentes. A Figura 6 mostra o relacionamento entre os diferentes tipos de flexibilidade. Segundo os autores a lógica a ser utilizada é a do ‘necessário para’. Por exemplo, para ter flexibilidade de produto, *mix* e operações as máquinas devem ser flexíveis. Idealmente um sistema deveria possuir a maior quantidade possível de todos os tipos de flexibilidade encontrados. Entretanto, como isto nem sempre é possível, algumas escolhas têm que ser realizadas.

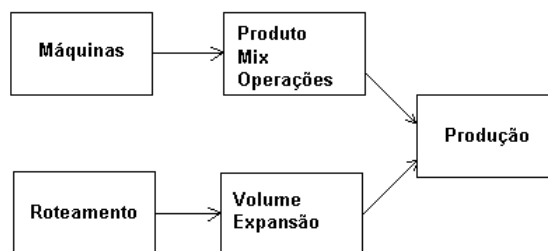


Figura 6: Relacionamento entre os tipos de flexibilidade de manufatura

Fonte: Browne *et al.* (1984)

Parker e Wirth (1999) investigam e discutem as correlações entre os seguintes tipos de flexibilidade de manufatura: máquinas \times *mix*; máquinas \times produto; máquinas \times operações; roteamento \times operações e roteamento \times volume. Existe correlação positiva entre os quatro primeiros pares pesquisados, enquanto que para a flexibilidade de roteamento \times de volume, a correlação ou não é linear ou depende da utilização do sistema - sistemas de pouca utilização apresentam relacionamento positivo e sistemas de grande utilização apresentam

relacionamento negativo (PARKER E WIRTH, 1999; GUPTA E GOYAL, 1992). De forma geral, segundo Parker e Wirth (1999), outras relações aceitas de forma geral pela literatura como positivas ocorrem entre máquinas × roteamento, máquinas × produção, *mix* × produto e *mix* × roteamento. Relações aceitas como negativas ocorrem entre máquinas × volume, *mix* × volume e produto × volume. Outros pares de comparação ainda devem ser desenvolvidos para estabelecer o relacionamento entre estes tipos de flexibilidade.

O relacionamento entre os tipos de flexibilidade obtidas da literatura está sumarizado na Tabela 8. As células da matriz identificam as citações ([1]) que propõem ou suportam o relacionamento. Observa-se grande concentração de trabalhos enfocando a relação entre a flexibilidade de máquinas com a flexibilidade de *mix*, produto e volume. Segundo Koste e Malhotra (1999), esta matriz pode ser utilizada para avaliar o grau de consenso que existe entre os pesquisadores sobre a presença/ausência de uma relação hierárquica entre os diferentes tipos de flexibilidade.

Tabela 8: Relacionamento entre tipos de flexibilidade de manufatura

Tipo de flexibilidade	Máquinas	Força de Trabalho	Sistema de movimentação	Roteamento	Operações	Expansão	Volume	Produção	Mix	Produto	Mercado	Programação	Entrega	Material
Máquinas				[6], [7]	[2], [6], [10]	[5], [7]	[2], [3], [5], [6], [7], [8]	[2], [6], [8]	[1],[2], [3], [5], [6], [7], [10]	[2], [3], [5], [6], [7], [8], [10]	[3]	[5]	[8]	
Força de Trabalho				[4]		[5]	[3], [4], [5], [8]		[3], [4], [5], [8]	[3], [4], [5], [8]	[3]	[5]	[8]	[4]
Sistema de movimentação				[7]		[2]	[2], [7]		[2], [7]	[7]				
Roteamento					[6], [7]	[2], [5], [7], [10]	[2], [5], [6], [10]	[7]	[5], [6]	[5]		[5], [7]		
Operações						[5], [7]	[5], [7]		[5], [7]	[5], [7]	[7]	[5]		
Expansão								[2]						
Volume								[2]	[5], [6], [9]	[6], [9]	[7]			
Produção									[7]	[7]				
Mix										[6], [9], [11]	[11]	[7]		
Produto											[7], [11]			
Mercado														
Programação														[5]
Entrega														
Material														

Citações: [1] Boyer e Leong (1996), [2] Browne et al. (1984), [3] Cox (1989), [4] Gerwin (1987), [5] Hyun e Ahn (1992), [6] Parker e Wirth (1999), [7] Sethi e Sethi (1990), [8] Slack (1987), [9] Suarez et al. (1995), [10] Chen e Chung (1996), [11] Dixon (1992)

Fonte: adaptado de Koste e Malhotra (1999)

2.2 LAYOUT

Considerações de ordem econômica têm forçado a constante avaliação e reconhecimento dos sistemas existentes, das pessoas e dos equipamentos. Devido às rápidas mudanças nas técnicas de produção e o surgimento de equipamentos novos, poucas empresas serão capazes de conservar suas instalações com o mesmo *layout* sem prejudicar sua posição competitiva no mercado (TOMPKINS *et al.*, 1996).

Uma das maneiras mais efetivas de aumentar a produtividade e reduzir custos é reduzir ou eliminar atividades desnecessárias ou que gerem desperdício. Estas atividades incluem a verificação da utilização dos equipamentos e pessoas, a necessidade do aumento da qualidade, a redução de estoques, a melhoria do processo produtivo (através do aumento do índice de valor agregado), o aumento da segurança e da saúde dos empregados e a utilização eficaz dos recursos energéticos, entre outras (TOMPKINS *et al.*, 1996). Todas estas atividades são realizadas ao se propor a modificação/adequação do *layout* de uma instalação existente.

Para Tompkins *et al.* (1996), o projeto do *layout* tem um impacto significativo no desempenho de um sistema de manufatura. Tradicionalmente, projetar o *layout* de uma área qualquer implica em planejar e integrar os caminhos dos componentes de um produto ou serviço, a fim de obter o relacionamento mais eficiente e econômico entre pessoas, equipamentos e materiais que se movimentam.

Neste sentido, os objetivos ao se melhorar o *layout* podem ser enumerados como sendo (KRAJEWSKI E RITZMAN, 2002; TOMPKINS *et al.*, 1996; FRANCIS *et al.*, 1992): melhorar a utilização do espaço disponível e racionalizar a disposição das seções; aumentar a satisfação, a segurança e a moral do trabalho, ordenar e limpar os ambientes; incrementar a produção racionalizando o fluxo; reduzir o manuseio e a movimentação de materiais no processo produtivo; reduzir o tempo de manufatura, diminuir esperas e distâncias percorridas; reduzir os custos indiretos com congestionamentos, manuseio e danos aos materiais e manter a flexibilidade das operações.

Segundo Tompkins *et al.* (1996), para melhorar o *layout* das instalações deve-se procurar integrar os diversos elementos da produção, tanto os diretos quanto os indiretos. Deve-se obedecer às exigências das operações de maneira que pessoas, materiais e equipamentos se movam em fluxo contínuo, organizado e de acordo com a seqüência lógica do processo de manufatura ou serviço. Neste sentido, devem-se evitar cruzamentos e retornos, e eliminar obstáculos indesejados. Outra diretriz importante é a minimização das distâncias:

como o transporte não acrescenta valor ao produto ou serviço, deve-se procurar uma maneira de reduzir ao mínimo as distâncias entre as operações para evitar esforços inúteis, cruzamentos excessivos e aumento dos custos. O espaço deve ser utilizado da melhor maneira possível, otimizando-se eficientemente as três dimensões: comprimento, largura e altura. Uma vez que a satisfação e a segurança do trabalhador são muito importantes, as áreas de trabalho devem promover tanto a elevação da moral do trabalhador quanto a diminuição dos riscos de acidentes. Por fim, deve-se aumentar a flexibilidade do *layout*.

Observa-se que são cada vez mais freqüentes e rápidas as necessidades de mudança do projeto do produto, as mudanças de métodos e de sistemas de trabalho. A falta de atenção a essas alterações pode levar uma empresa a ficar obsoleta. Por isso, no projeto do *layout* flexível, deve-se considerar que se as condições mudarem, as mudanças devem ocorrer com facilidade e a adaptação às novas condições deve ocorrer o mais rapidamente possível. Segundo Francis *et al.* (1992), um *layout* flexível é aquele que acomoda facilmente modificações no projeto dos produtos, no processo e na produção. Em geral, as mudanças de *layout* decorrem da necessidade de gerar maior espaço físico para acomodar pessoas e equipamentos. Quanto mais flexível um *layout*, maior o tempo que decorre entre duas mudanças.

2.2.1 Relações entre atividades de produção e layout

Segundo Groover (2001), a manufatura discreta de peças pode ser classificada segundo a atividade de produção em função do *layout* das instalações.

Considerando a atividade de produção, existem três tipos principais de sistemas de produção: pequena produção (*job shop*), produção em lote ou batelada e produção em massa (GROOVER, 2001). O tipo *job shop* é caracterizado pelo baixo volume de produção e pela grande variedade de peças fabricadas. A produção em lotes é caracterizada pela fabricação de lotes de tamanho médio de forma contínua ou intercalada. A produção em massa é caracterizada pelas altas taxas de produção, com equipamentos dedicados à produção de um produto em particular.

A classificação em função do *layout* da fábrica está associada ao sistema de produção de peças discretas: posição fixa, orientado a processo ou funcional, e orientado a produto (GROOVER, 2001).

No primeiro tipo, o termo posição fixa se refere ao produto, que fica fixo em função do seu tamanho e peso. Quem se desloca são os equipamentos utilizados na sua fabricação.

Usualmente este tipo de *layout* é associado ao sistema de produção do tipo *job shop*, desde que mantidas suas características.

No *layout* orientado a processo (funcional), as máquinas de produção são arranjadas em grupo de acordo com o tipo geral de processo de manufatura. Este tipo de *layout* é comum em sistemas de produção do tipo *job shop* e em lotes, caracterizados pela alta variedade de produtos ou pelos pequenos volumes de produção que, neste caso, fornecem maior flexibilidade. Entretanto, segundo Benjaafar *et al.* (2002), o *layout* funcional também é notório por sua ineficiência na movimentação dos materiais e pela complexidade da programação, que pode levar a *lead times* longos, grande volume de *work-in-process* e subutilização dos recursos. Mudanças no *mix* e no roteamento de produtos neste tipo de *layout* implicam em modificações no projeto do *layout* e do sistema de movimentação de materiais, usualmente com custos altos (YANG E PETERS, 1998; LAHMAR E BENJAAFAR, 2002 E BENJAAFAR *et al.*, 2002).

O *layout* orientado a produto é preferido quando a fábrica é especializada na produção de um produto ou de uma classe de produtos em larga escala, sendo que os equipamentos são rearranjados da forma mais eficiente para a produção dos mesmos. Este tipo de *layout* normalmente é associado a sistemas de produção em linha.

A manufatura baseada em células (manufatura celular) combina a eficiência do *layout* orientado ao fluxo do produto com a flexibilidade do *layout* orientado a processo em sistemas de produção em lotes. Na manufatura celular, o sistema de manufatura é decomposto em um conjunto de centros de trabalho ou células. Cada centro de trabalho agrupa um conjunto de equipamentos e processos dedicados ao processamento de uma família de peças com requisitos similares. Como resultado da utilização da organização celular, os tempos de transporte de material, os tempos de *setup*, as restrições para balanceamento das linhas, a variabilidade dos tempos de ciclo e o *work-in-process* podem ser reduzidos, a implementação da automação pode ser facilitada, o monitoramento e o controle dos estoques e da qualidade podem ser melhorados e os recursos humanos podem ser melhor utilizados (BLACK, 1998; ASSAD *et al.*, 2003). Segundo Benjaafar (2002), este tipo de *layout* é projetado para a produção de um conjunto específico de produtos, cujos níveis de demanda são assumidos como estáveis e cujo ciclo de vida do produto é tomado como sendo razoavelmente longo, o que nem sempre é o caso. Alguns autores têm proposto alternativas para superar estes problemas do *layout* celular, como a sobreposição de células, o compartilhamento de máquinas e as células fractais. Surgem, assim, na literatura os termos robusto, fractal, virtual, distribuído, holônico e holográfico, entre outros. Para um maior aprofundamento, ver os

trabalhos de Gupta e Tompkins (1982), Venkatadri *et al.* (1997), Askin *et al.* (1999), Montreil *et al.* (1999), Benjaafar *et al.* (2002) e Balakrishnan e Cheng (2007).

Conforme D'Angelo *et al.* (2000) puderam observar, o *layout* do tipo *job shop* costuma ter o melhor desempenho na maioria das condições de teste que tem relação com eficiência (utilização média, operar desbalanceado, número de máquinas), gerando minimização de recursos e aumento da flexibilidade de roteamento. O *layout* em linha propicia as maiores economias em termos de tempos de *setup*, que por sua vez estão associados a agilidade (tamanho do lote, WIP e tamanho dos *buffers*) porém torna o sistema inflexível em termos de roteamento. Para os autores, formas híbridas de *layout* asseguram o desempenho intermediário entre custos de *setup* e flexibilidade de roteamento, que estão associados à eficiência e agilidade do *layout*.

Segundo Benjaafar *et al.* (2002), os tipos de *layout* acima, designados por convencionais não atendem às necessidades de ambientes altamente voláteis, com grande variedade de produtos, que podem ser customizados e que possuem, na maioria das vezes, um ciclo de vida curto. *Layouts* convencionais são tipicamente projetados para um *mix* específico de produtos e para volumes de produção específicos, assumidos constantes para um período de 3 a 5 anos, comumente. Conseqüentemente, o desempenho diminui quando o volume, o *mix* ou o roteamento variam muito (AFENTAKIS *et al.*, 1990; BRAGLIA *et al.*, 2003; LAHMAR E BENJAAFAR, 2005; IRANI E HUANG, 2006). Observa-se a necessidade de auxiliar a projetar *layouts* flexíveis, que operam em ambientes dinâmicos.

2.2.2 Abordagem algorítmica

A maioria dos algoritmos, referentes ao *layout*, variam relativamente a quatro características básicas: o tipo de dados de entrada, o tipo de função objetivo, a forma de representação do *layout* e o propósito do estudo (de melhoria ou um projeto totalmente novo) (TOMPKINS *et al.*, 1996).

A primeira característica considera o tipo de dados de entrada que os algoritmos requerem. Alguns algoritmos somente aceitam dados qualitativos de fluxo, necessitando para isso de uma informação gerada, por exemplo, através de um diagrama de relacionamentos. Outros algoritmos trabalham com informações quantitativas, necessitando de uma matriz de fluxo expressa mediante uma matriz 'de-para', por exemplo. Existem algoritmos que mesclam os dois tipos de dados de entrada (ROSENBLATT, 1979; DUTTA E SAHU, 1982; URBAN, 1987; HARMONOSKY E TOTTERO, 1992). De forma geral, algoritmos baseados em dados

quantitativos demandam maior esforço e tempo na coleta de dados mas, em contrapartida, geram maiores informações quanto ao fluxo das peças.

A segunda característica se refere à função objetivo. Pode-se desejar atingir dois objetivos: minimizar a soma das distâncias percorridas ou maximizar o escore das adjacências. Neste trabalho, dois fatores primários de flexibilidade de *layout* expostos no Capítulo 3 são embasados nas idéias implícitas nessas funções objetivos.

No primeiro caso, geralmente a função objetivo está relacionada aos dados de entrada que são apresentados na forma de uma matriz ‘de-para’. A função objetivo pode ser expressa matematicamente pela equação (1), característica dos QAP (*quadratic assignment problem* ou problemas de alocação quadrática):

$$\min z = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m f_{ij} c_{ij} d_{ij} \quad (1)$$

onde:

m é o número de departamentos;

f_{ij} é o fluxo do departamento i para o j (expresso em número de unidades de carga que se movem por unidade de tempo);

c_{ij} é o custo de mover uma unidade de carga entre os departamentos i e j ;

d_{ij} é a distância entre os departamentos i e j , que em muitos casos é considerada a distância retilínea entre centróides.

Segundo Francis *et al.* (1992), exceto para *layouts* com poucos departamentos, não se pode obter uma solução exata para esta função objetivo sem um esforço computacional razoável. Além disso, de acordo com Heragu e Kusiak (1990), para que se chegue a uma solução satisfatória é necessário que se represente a área física ocupada pela instalação. Exemplos de aplicação dos QAP podem ser encontrados em Foulds (1983), Kaku e Rachamadugu (1992), Bozer *et al.* (1994) e Balakrishnam *et al.* (2003).

No segundo caso, a função objetivo demanda dados de entrada organizados na forma de diagrama de relacionamentos. A função objetivo pode ser expressa matematicamente conforme a equação (2). Esta medida geralmente não é uma medida completa da eficiência do *layout*, pois desconsidera a distância ou a separação entre departamentos não adjacentes.

$$\max z = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m f_{ij} x_{ij} \quad (2)$$

onde:

m é o número de departamentos;

f_{ij} é o fluxo do departamento i para o j (expresso em número de unidades de carga que se move por unidade de tempo);

$x_{ij} = 1$ se os departamentos i e j são adjacentes (dividem uma fronteira);
 $x_{ij} = 0$ se os departamentos i e j não são adjacentes.

A terceira característica se refere à forma de representação do *layout*, que pode ser discreta ou contínua. Na forma discreta, o *layout* é armazenado e manipulado como uma matriz. Para tanto, todas as áreas são subdivididas em quadrados de acordo com as proporções. Na forma contínua, o espaço não é dividido em pequenos quadrados. A diferença na representação discreta e contínua dos *layouts* pode ser observada na Figura 7.

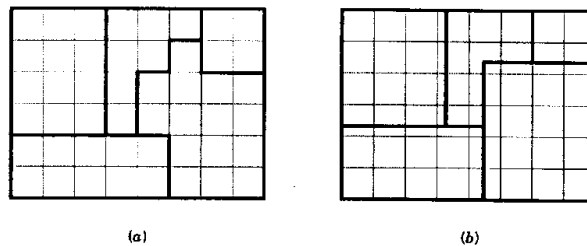


Figura 7: Representação discreta (a) e contínua (b) do *layout*
 Fonte: Tompkins *et al.* (1996)

A quarta característica se refere à função primária de melhorar o *layout* existente ou construir um *layout* novo. Com relação a esta característica, geraram-se três abordagens algorítmicas distintas, que são encontradas na maioria dos algoritmos computacionais para a solução de problemas de *layout*; são elas: *i*) diagrama de relacionamentos para *layouts* novos, utilizando variações do planejamento sistemático de *layout* (SLP) de Muther (1978) e Apple (1977); *ii*) método de troca pareada para melhoria de *layout* existente, baseado nas cartas de Reed (1961) e Buffa *et al.* (1964); *iii*) método de construção baseada em grafos para *layouts* novos, também fortemente embasado no planejamento sistemático de *layout* de Muther (1978). Para aprofundamento sobre os algoritmos para a solução de problemas de *layout* ver os trabalhos de Kusiak e Heragu (1987), Meller e Gau (1996a), Balakrishnan e Cheng (1998) e Singh e Sharma (2006).

2.2.3 Abordagem metodológica

Segundo Foulds (1983) e Lee (1998), existem abordagens metodológicas para solucionar o projeto de *layout* de instalações, dentre elas a abordagem estratégica (Wrennall, 1997) e a abordagem sistemática, das quais o planejamento sistemático de *layout* (SLP) é um exemplo (Muther, 1978), entre outras.

Uma metodologia prática, que auxilia a projetar um projeto de instalações e engloba os conceitos anteriormente apresentados foi proposta por Lee (1998). O autor propõe uma

metodologia de projeto de *layout* de instalações que procura aplicar os conceitos do planejamento sistemático de *layout* de Muther (1978) e insere o componente estratégico no planejamento, o que acaba lhe dando um caráter dinâmico (ao considerar a expansão futura). Esta metodologia, o Fac Plan, engloba cinco níveis de planejamento do espaço: global, supra, macro, micro e sub-micro. Parte-se da definição da localização global da empresa (nível global), aborda-se a localização do terreno e o posicionamento dos prédios (nível supra), passa-se pelo projeto do posicionamento dos departamentos (nível macro), projeta-se cada departamento em si (nível micro) e acaba-se no projeto individual do posto de trabalho (nível sub-micro). Na execução do Fac Plan, o que mais se aplica ao que popularmente é considerado um estudo de *layout* é a condução das tarefas para melhorias nos níveis macro e micro. Na sistemática proposta, a maioria dos indicadores impacta no nível macro e micro, embora algumas melhorias em indicadores específicos impactem nos níveis restantes.

2.2.4 Avaliação de layout

Analisando-se a literatura, verifica-se uma maior concentração de trabalhos enfocando o projeto de execução do *layout* de uma instalação do que a avaliação do *layout*, seja existente ou novo. Segundo Lin e Sharp (1999a), os mesmos fatores de desempenho que levam ao projeto de uma boa alternativa de *layout* também devem ser úteis na avaliação das diversas alternativas.

O objetivo ao se avaliar um *layout* é investigar alternativas teóricas para o *layout*, sob restrições reais de tempo e disponibilidade de informações, realizando um esforço prévio antes de implementar as mudanças, sem que seja necessário um novo rearranjo do *layout*, custoso e que gere perdas na produção. Segundo Gantz e Petit (1953) *apud* Wilson (1962), o *layout* de uma instalação pode ser avaliado pelos seguintes critérios: *i*) distância proporcional em que os materiais podem ser movidos mecanicamente em relação ao total de movimentação; *ii*) distância total percorrida; *iii*) proporção de máquinas que foram movimentadas em um turno sobre o total de máquinas; *iv*) proporção da área total ocupada por corredores; e *v*) proporção do volume cúbico utilizado em relação ao volume cúbico total.

Konz (1985) *apud* Lin e Sharp (1999a) subdividem os índices de avaliação do *layout* em três categorias conforme: *i*) utilização dos recursos (pessoas, equipamentos, espaço e energia); *ii*) gerenciamento e controle (matérias, movimentação e perdas); e *iii*) eficiência das operações (manufatura, armazenamento e retirada de estoque, recebimento e envio).

Segundo Lin e Sharp (1999b), as limitações e deficiências dos índices de avaliação do *layout* são: dificuldade de obtenção de parâmetros, necessidade de dados muito detalhados ou mesmo indisponíveis, indisponibilidade de dados antes do início da operação e inexistência de um modelo genérico para avaliação e validação clara do mesmo. Desta forma, os autores apresentam uma metodologia de integração que discute a designação de pesos, normalização, direção, sensibilidade e correção de deficiências e desequilíbrio nos dados.

Lin e Sharp (1999a) apresentam um conjunto estruturado de critérios para avaliar o problema do *layout* das instalações, onde diversos fatores são condensados em 18 critérios e classificados em três grupos: relativos a custo, a fluxo e a ambiente, conforme apresentado na Tabela 9.

Tabela 9: Conjunto de grupos, classes e critérios para avaliação de *layout*

Custo		Fluxo			Ambiente	
Não inventariado	Inventariado	Relacionamento do espaço	Fluxo de Materiais	Robustez e flexibilidade	Adjacências	Qualidade do ambiente
Custo inicial de:	Estoque de matérias primas	Características da instalação: paredes, colunas, escadas e elevador	Corredores	Robustez da capacidade dos equipamentos	Topografia e topologia	Segurança das pessoas
- terreno						
- construção			Distância e densidade de volume	Expansão das instalações	Desenvolvimento da comunidade	Conforto dos trabalhadores
- maquinário da produção						
- equipamento de movimentação de materiais	Estoque de produtos em processamento	Suficiência e utilização do espaço				Segurança das instalações
Custo de operação e manutenção anuais:	Estoque de produtos acabados					Programa de manutenção
- força de trabalho						
- utilidades						
- manutenção						
Valor de utilização futuro						

Fonte: Lin e Sharp (1999a e 1999b)

Em relação a fluxo, que em termos operacionais possui maior impacto no *layout*, verifica-se a influência das características da instalação, a suficiência e a utilização do espaço, o fluxo de materiais nos corredores, a distância e a densidade de volume, a robustez e a capacidade dos equipamentos e a possibilidade de expansão das instalações.

De acordo com os autores, o índice de avaliação de custo é econômico. Os critérios de avaliação de fluxo e de ambiente são apresentados na Tabela 10.

Kochhar e Heragu (1999) afirmam que a eficiência de um *layout* pode ser medida por critérios quantitativos e qualitativos, muitos dos quais de forma muito subjetiva. Entre estes critérios de eficiência encontram-se a automação de sistemas de movimentação de materiais, a utilização de rotas fixas ou variáveis, o tamanho dos estoques e os níveis de inventário admissíveis.

Yang e Kuo (2003) utilizam a análise hierárquica do processo para avaliar diferentes alternativas de *layout*. A metodologia proposta considera objetivos tanto qualitativos quanto quantitativos. Cada alternativa foi avaliada quanto à distância, adjacência, formato dos departamentos, flexibilidade, acessibilidade e manutenção.

Tabela 10: Estrutura dos critérios de fluxo e de ambiente

Fluxo					
Relacionamento do espaço		Fluxo de Materiais		Robustez e flexibilidade	
Características da instalação: paredes, colunas, escadas e elevador	Suficiência e utilização do espaço	Corredores	Distância e densidade de volume	Robustez da capacidade dos equipamentos	Expansão das instalações
Número e localização das características não removíveis	Espaço para o maquinário da produção	Áreas servidas	Distância	Custo inicial	Espaço livre
Número e localização das características removíveis	Espaço para armazenamento	Espaço	Volume	Custo de operação e manutenção	Espaço utilizado
Tipo de configuração do espaço	Espaço para necessidades pessoais	Distância entre departamentos	Tempo	Distância	Dificuldade para mover os departamentos
	Espaço de corredores e movimentação pessoal	Facilidade de acesso			
	Espaço livre	Número de rotas (variáveis ou fixas)		Suficiência do equipamento de movimentação de materiais	
	Eficiência de utilização do espaço	Número de intersecções		Utilização do equipamento de movimentação de materiais	
		Forma dos departamentos		Capacidade de carga	
Largura					
Ambiente					
Adjacências		Qualidade do ambiente			
Topografia e topologia	Desenvolvimento da comunidade	Segurança das pessoas	Conforto dos trabalhadores	Segurança das instalações	Programa de manutenção
Condições naturais do local e da construção	Impacto no tráfego e geração de barulho	Acidentes com pessoas	Iluminação	Roubo externo	Compatibilidade entre a construção e o equipamento de movimentação de materiais
Acesso de caminhões e modelos de circulação interna	Gerenciamento dos resíduos e controle dos poluentes	Cruzamentos entre veículos e pessoas	Barulho	Roubo interno	Espaço para a área de manutenção
Conexão com transporte externo	Aparência externa - imagem	Interfaces entre máquinas, pessoas e materiais	Ventilação/ aquecimento	Precaução com áreas perigosas	Localização da área de manutenção
			Ergonomia		Complexidade do equipamento de movimentação de materiais
			Acessibilidade Universal		

Fonte: Lin e Sharp (1999a)

2.3 LAYOUTS EM AMBIENTES DINÂMICOS

As empresas trabalham em ambientes cada vez mais voláteis e com freqüente introdução de novos produtos; ao mesmo tempo em que determinam que a efetivação destas mudanças não deve causar interrupções na produção. Assim, é comum optar-se em conviver com as ineficiências do *layout* existente, evitando o rearranjo, ao invés de investir em um rearranjo de *layout*, operação custosa que logo pode deixar o *layout* obsoleto novamente (BENJAAFAR *et al.*, 2002).

Há consenso na literatura de que as configurações de *layouts* existentes não atendem as demandas atuais das empresas e que existe a necessidade de uma nova geração de *layouts*, mais flexíveis, modulares e reconfiguráveis. Esta nova geração de *layouts* vem sendo designada de formas diferentes, como, por exemplo, dinâmico, distribuído, reconfigurável, robusto, modular e ágil, entre outros (ROSENBLAT E LEE, 1987; MONTREIL E VENKATADRI, 1991; MONTREIL E LAFORGE, 1992; VENKATADRI *et al.*, 1997; YANG E PETERS, 1998; ASKIN *et al.*, 1999; KOCHAR E HERAGU, 1999; MONTREIL *et al.*, 1999; BENJAAFAR E SHEIKHZADEH, 2000; HERAGU E ZIJM, 2001; BENJAAFAR *et al.*, 2002; KULTUREL-KONAK *et al.*, 2004; MENG *et al.*, 2004, LAHMAR E BENJAAFAR, 2005; ELMARAGHY, 2006; IRANI E HUANG, 2006).

Meng *et al.* (2004) representam a problemática da organização da nova geração de *layouts* conforme a Figura 8. Segundo os autores, o modelo apresenta três camadas físicas: o *mix* dos produtos, os tipos de máquinas e a localização das máquinas na instalação. As duas camadas virtuais, compostas pelo roteamento dos produtos e pelo *layout*, descrevem atividades de projeto envolvendo a camada inferior e a superior de cada camada física. Por exemplo, o problema do *layout* é encontrar uma localização para cada máquina ou tipo, dentro do espaço. Além destas relações, as camadas se relacionam, pois existem restrições de vários tipos, como espaço, posicionamento, negócios, construção, entre outras.

Os métodos para projetar *layouts* em ambientes dinâmicos podem ser baseados nos mesmos critérios usados para se avaliar *layouts* convencionais. Tradicionalmente pode-se utilizar diferentes critérios: *i*) eficiência de movimentação de materiais; *ii*) critério de robustez baseado em desempenho médio; *iii*) critério combinado de média e variância da quantidade prevista de vendas de cada produto para minimizar as flutuações de desempenho; ou *iv*) critério de desempenho operacional (BENJAAFAR *et al.*, 2002).

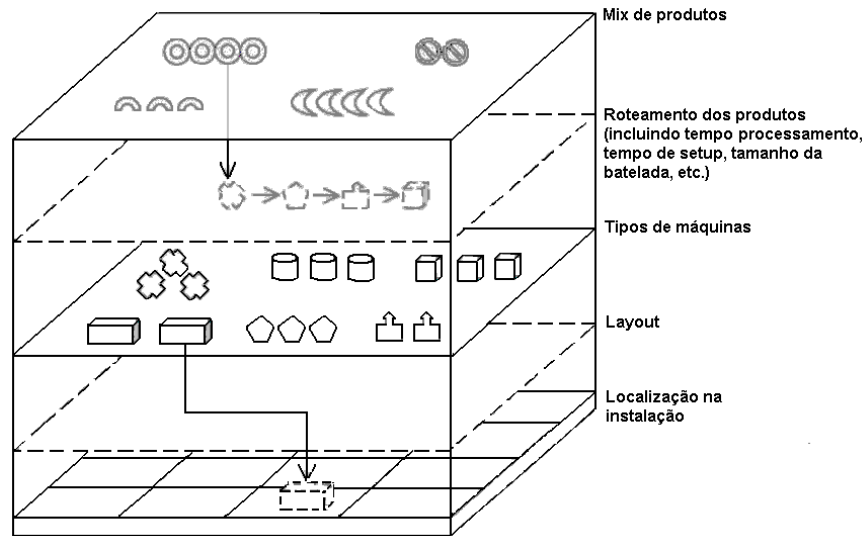


Figura 8: Modelo de referência para o problema do *layout*

Fonte: Meng *et al.* (2004)

A maioria dos modelos utiliza a eficiência da movimentação de materiais, ou seja, a soma ponderada das distâncias percorridas pelo sistema de movimentação de materiais (MELLER E GAU, 1996b). Um exemplo pode ser observado no trabalho de Webster e Tyberghein (1980). Os autores enfocam que ser flexível é uma meta desejável de um *layout*. Entretanto, segundo os mesmos autores, não se encontram procedimentos pelos quais diferentes alternativas de *layout* possam ser avaliadas com respeito à quantidade de flexibilidade que devam possuir. Assim, os autores propõem avaliar a flexibilidade de um *job-shop* pela minimização do custo de movimentação anual dos materiais (discriminado por produto), pois este custo possui impacto significativo na provável redução e é de grande importância quando se trata deste tipo de sistema de produção. Levam em conta seis produtos; em cada *layout* um produto é considerado prioritário em termos de localização das máquinas e das áreas de estocagem e para cada produto é estabelecida a melhor seqüência de operações das peças que o compõem.

Outros modelos utilizam critérios de robustez, baseados não em desempenho médio e sim em habilidade em garantir determinado desempenho em cada período sob cada cenário (ROSENBLATT E LEE, 1987; AFENTAKIS *et al.*, 1990; YANG E PETERS, 1998). Outros ainda utilizam um critério combinado de média e variância da quantidade demandada de cada produto oferecido para minimizar as flutuações de desempenho (KULTUREL-KONAK *et al.*, 2004; NORMAN E SMITH, 2006).

Por fim, alguns autores têm considerado critérios de desempenho operacionais como, por exemplo, tempo de *setup*, tempo de ciclo, *work-in-process* (WIP), formação de lotes,

carga e descarga, congestionamento, entre outros, que podem apresentar resultados muito diferentes dos anteriormente enfocados (FU E KAKU, 1994; AZADIVAR E WANG, 2000; HERAGU E ZIJM, 2001; BENJAAFAR *et al.*, 2002; BENJAAFAR, 2002; MENG *et al.*, 2004). Benjaafar *et al.* (2002) chamam este tipo de *layout* de ágil, pois quando o período de planejamento e produção diminui, muda-se o foco de longo prazo, baseado em custo e eficiência para um foco de curto prazo, baseado em correspondência e agilidade. Por exemplo, Benjaafar (2002) mostra que a distância média percorrida pelos materiais é um indicador insuficiente para medir o desempenho de um *layout*; tal indicador necessita, por exemplo, ser complementado pela taxa de utilização do sistema. Segundo este autor, a distância média percorrida pelos produtos (objetivo do QAP; ver seção 2.3.2) em sistemas com alta taxa de utilização pode ser menor, mas os congestionamentos e atrasos podem ser maiores, aumentando o tempo de *WIP* do produto e vice-versa. Azadivar e Wang (2000) utilizam simulação e algoritmos genéticos para otimizar um *layout* levando em conta o tempo que o material é transportado e, conseqüentemente, o tempo de ciclo e a produtividade.

2.3.1 Classificação dos layouts em ambientes dinâmicos

Observa-se que a nomenclatura utilizada para os *layouts* em ambientes dinâmicos ainda não está totalmente consolidada, sendo que diferentes autores propõem diferentes classificações e referências. Para exemplificar, pode-se tomar os trabalhos de Balakrishnam e Cheng (1998), Benjaafar *et al.* (2002) e Meng *et al.* (2004).

Neste trabalho, será adotada a classificação de Benjaafar *et al.* (2002), que pode ser observada na Tabela 11. Esta classificação depende do grau de incerteza das necessidades futuras da produção e do custo de rearranjo do *layout*, podendo-se escolher entre os 4 tipos de *layouts* apresentados na Tabela 11. Um *layout* dinâmico é útil quando tanto as incertezas sobre necessidades futuras da produção quanto os custos do rearranjo do *layout* são baixos. Balakrishnam e Cheng (1998) discordam, pois afirmam que quando o custo de rearranjo do *layout* é baixo não se necessita utilizar o *layout* dinâmico; o *layout* pode ser alterado assim que a demanda for alterada, sem nenhum planejamento anterior. Para estes autores, o *layout* dinâmico é aconselhável quando os custos de rearranjo do *layout* não são nem negligenciáveis nem proibitivos. O *layout* robusto é preferido quando as incertezas das necessidades futuras da produção são baixas, entretanto os custos do rearranjo do *layout* são altos. O *layout* reconfigurável é desejável quando as incertezas das necessidades futuras da produção são altas, mas os custos do rearranjo do *layout* são baixos. O *layout* distribuído é indicado quando

tanto as incertezas das necessidades futuras da produção quanto os custos do rearranjo do *layout* são altos.

Tabela 11: Escolha do tipo do *layout* em função do grau de incerteza com respeito às necessidades futuras da produção e do custo do rearranjo do *layout*

Custo do rearranjo do <i>layout</i>	Incerteza das necessidades futuras da produção	
	Baixo	Alto
Baixo	Dinâmico	Reconfigurável
Alto	Robusto	Distribuído

Fonte: Benjaafar *et al.* (2002)

Meng *et al.* (2004) apresentam o *layout* dinâmico, robusto e reconfigurável de forma diferente, e determinam o custo de realocação de máquinas, de movimentação dos materiais e de ocupação do chão-de-fábrica baseando-se na disponibilidade de dados (passado, presente e futuro) e nas medidas de desempenho, pertencentes a cenários específicos, conforme pode ser observado na Figura 9. Cada cenário apresenta variações de *mix*, disponibilidade diferenciada de máquinas, diferenças no tamanho de batelada e no tempo de *setup*, entre outros. Segundo estes autores, o *layout* dinâmico pressupõe dados de produção determinísticos e tenta encontrar a melhor seqüência de *layout* levando em conta períodos múltiplos de planejamento futuros. O *layout* robusto assume dados de produção estocásticos e considera o contexto do *layout* levando em conta cenários múltiplos futuros (nestes cenários estão consideradas todas as incertezas de demanda futuras). Tanto no *layout* dinâmico como no robusto, se assume que o planejamento para os períodos múltiplos futuros de planejamento é conhecido, o que nem sempre é verdade. Segundo eles, o *layout* reconfigurável apresenta uma versão mais realista por considerar o período atual para estimar os custos de movimentação e o desempenho de cada *layout*. Considerando que a incerteza do futuro é muito grande em relação a volume e *mix* de produtos, pode-se considerar o período passado como atual e o atual como futuro.

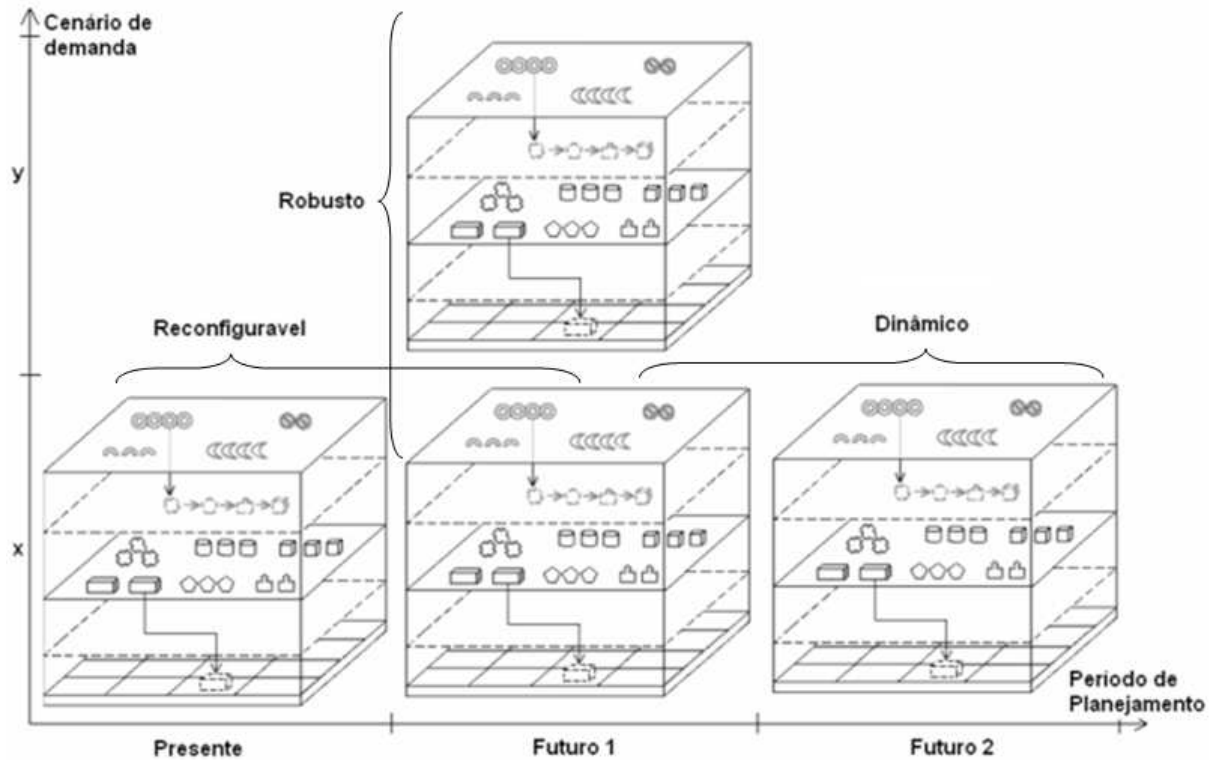


Figura 9: Problemas de *layout* reconfigurável, dinâmico e robusto

Fonte: Meng *et al.* (2004)

Os custos do rearranjo do *layout* incluem dois tipos: os devidos à perda de produção, pelo tempo que não se está produzindo, e os devidos à movimentação de equipamentos para um novo local, incluindo o planejamento, a desmontagem, a movimentação e a re-instalação (AFENTAKIS *et al.*, 1990; KOCHHAR E HERAGU, 1999).

Segundo Kusiak e Heragu (1987) e Heragu e Kusiak (1988 e 1991), os algoritmos que resolvem o problema do *layout* das instalações podem ser classificados em dois grupos: algoritmos que apresentam solução ótima e algoritmos que apresentam solução sub-ótima. Desde o início de 1960, pesquisas foram realizadas para desenvolver algoritmos ótimos na solução do problema do *layout* das instalações. Esses algoritmos dividem-se em duas classes: algoritmos de *branch and bound* e algoritmos de planos de corte. Os algoritmos ótimos apresentam a desvantagem de precisarem maior tempo de processamento e espaço de armazenamento. O maior problema, para o qual foi determinado uma solução ótima, tinha 15 departamentos. Por este motivo, as pesquisas foram direcionadas a concentrar-se nos algoritmos sub-ótimos para resolver o problema do *layout* das instalações. Procurou-se desenvolver métodos heurísticos, que não garantem uma solução ótima, mas providenciam soluções aceitáveis com esforço computacional razoável. Estes métodos são classificados como: algoritmos construtivos, algoritmos de melhoramento, algoritmos híbridos e algoritmos

baseados na teoria dos grafos (KUSIAK E HERAGU, 1987; HERAGU E KUSIAK 1988, 1991).

Nas seções seguintes serão apresentadas as revisões de literatura sobre *layouts* dinâmico, robusto, reconfigurável e distribuído.

2.3.1.1 *Layout* Dinâmico

Suponha que seja identificado um grupo de departamentos, o fluxo de materiais entre cada par de departamentos e o custo por unidade de fluxo e de distância. Tomando como base um ambiente estático, os departamentos são rearranjados de forma que a soma dos custos entre os departamentos é minimizada, conforme pode ser observado na equação (1). O fluxo de materiais é assumido constante. O *layout* dinâmico corrige estas deficiências ao projetar um *layout* que desempenhe bem no tempo e que se baseie em um fluxo de materiais que muda ao longo dos períodos. Em uma análise de *layout* dinâmico, investiga-se o médio/longo prazo buscando responder qual o melhor *layout* em cada período e com que frequência esse *layout* deve mudar. Assim, é realizada uma avaliação de custo-benefício, em múltiplos períodos, entre o excesso de fluxo de materiais, se o *layout* não for rearranjado, e os custos de rearranjo. O objetivo quantitativo é minimizar o custo de movimentação do material enquanto que o objetivo qualitativo é maximizar as taxas de proximidade. Operacionalmente, a análise de *layouts* dinâmicos utiliza uma matriz ‘de-para’ e um vetor de custos associados à mudança para diferentes períodos (ROSENBLATT, 1986; MONTREIL E VENKATADRI, 1991; LACKSONEN, 1997; BALAKRISHNAN E CHENG, 1998).

Segundo Balakrishnan e Cheng (1998), o problema dinâmico envolve a seleção de um *layout* estático para cada período. Na seqüência decide-se se no próximo período o *layout* será mantido ou alterado, tomando como base os custos de mudança e a eficiência da movimentação dos materiais. Mesmo em um ambiente dinâmico, a abordagem estática pode ser utilizada. Para que isto aconteça, podem-se adotar os seguintes cursos de ação: a) utilizar um período suficientemente pequeno tal que o fluxo possa ser considerado constante; e b) utilizar um período longo e negligenciar que ocorra alteração do fluxo interdepartamental e intermáquinas entre os períodos.

Balakrishnan e Cheng (1998) realizam uma revisão criteriosa dos algoritmos para *layouts* dinâmicos, classificando-os segundo a abordagem quanto à área dos departamentos (igual/diferente), quanto ao fluxo (determinístico/estocástico) e indicando os autores em cada caso. Rosenblatt (1986) foi um dos primeiros a desenvolver um modelo formal e um

procedimento de busca de solução para determinar um *layout* ótimo considerando períodos múltiplos. Desde então, uma série de trabalhos, incluindo Afentakis *et al.* (1990), Montreil e Venkatadry (1991), Balakrishnan *et al.* (1992), Montreil e Laforge (1992), Palekar *et al.* (1992), Urban (1992 e 1998), Lacksonen e Emory Ensore (1993), Lacksonen (1997), Balakrishnan e Cheng (1998, 2000 e 2009), Kochhar e Heragu (1999), Balakrishnan *et al.* (2000), Benjaafar *et al.* (2002), Braglia *et al.* (2003), Dunker *et al.* (2005), Ulutas e Islier (2005) têm abordado o assunto.

2.3.1.2 *Layout* Robusto

Neste tipo de problema a lógica de concepção favorece um *layout* satisfatório em detrimento de um *layout* ótimo. A robustez de uma alternativa pode ser medida pela percentagem de vezes que a solução permanece dentro da faixa da solução ótima. Refraseando, o usuário está escolhendo a alternativa que fica mais freqüentemente perto da solução ótima, pois a solução ótima não acontece na prática, é uma idealização. A incerteza real em termos de *layout* é devida à combinação de diferentes itens em diferentes níveis, que pode resultar numa matriz de fluxos diferentes, que por sua vez pode resultar num *layout* escolhido diferente do ideal (ROSENBLATT E LEE, 1987). Braglia *et al.* (2003) simplificam dizendo que um *layout* robusto é alcançado ao se optar por uma alternativa que se comporte eficientemente bem, na maioria das vezes, mesmo que o *mix* e/ou o volume variem. Para Benjaafar e Sheikhzadeh (2000) e Lahmar e Benjaafar (2005), ter um *layout* robusto é ter um *layout* flexível.

Shore e Tompkins (1980) *apud* Balakrishnan e Cheng (2009) utilizaram o critério de custo de penalização para projetar *layouts* robustos. Segundo eles, dado um conjunto de cenários e suas probabilidades de ocorrência, pode-se calcular custos de penalização para cada *layout* candidato. É considerado mais robusto o *layout* com menor número esperado de penalizações. Rosenblatt e Lee (1987) se basearam no trabalho de Shore e Tompkins (1980) para estabelecer os critérios para um *layout* robusto. Os autores consideram um ambiente de incerteza no qual o valor exato da probabilidade de ocorrência de diferentes cenários é desconhecido. Segundo eles, mediante incerteza, é melhor escolher uma alternativa de *layout* que se comporte bem em todos os cenários, em detrimento de uma alternativa ótima para um cenário (que pode eventualmente não ocorrer) e desempenhe mal nos cenários possíveis de ocorrência.

Afentakis *et al.* (1990) verificam se o rearranjo do *layout* deve ocorrer levando em conta uma estratégia de periodicidade de alterações (variação de tempo decorrido entre sucessivas modificações de *layouts*), ou uma estratégia de atingimento de um valor-alvo (variação percentual de peças produzidas, variação percentual de roteamento ou variação percentual no volume de peças produzidas). Foram realizadas simulações com alterações de cenários para verificar o impacto dessas variáveis no número de máquinas no sistema, número de peças no sistema, roteamento das peças no sistema, volume de peças produzidas em cada período, estabilidade de volume no tempo e frequência de alterações no portfólio das peças. Os resultados indicam que numa situação dinâmica, o volume de movimentações: tende a aumentar à medida que não se rearranja o *layout* periodicamente, e tende a aumentar se ocorre elevação do volume de peças produzidas, elevação do número de roteamentos e alteração do *mix* de produtos. Quando o *mix* dos produtos é alterado, é melhor rearranjar o *layout* baseado na política de atingimento de um determinado valor-alvo. Também se concluiu que um *layout* errado pode aumentar os custos de movimentação em 36%, dado o período e as condições examinadas pela simulação. Além disto, também se aumenta o espaço necessário para estocagem, os estoques em processamento, o tempo de atravessamento e os mecanismos de controle.

Yang e Peters (1998) consideram um modelo de períodos múltiplos com cenários diferentes e suas probabilidades associadas. Consideram períodos móveis, com duração t variando de zero a T , nos quais o *layout* pode ser rearranjado ao final dos mesmos. Se o tempo de rearranjo é curto ($t = 0$), o *layout* deve ser rearranjado mais frequentemente, sendo considerado como dinâmico. Se o período $t=T$, então o *layout* é chamado de robusto, desde que o mesmo *layout* tenha sido mantido durante todo o horizonte, podendo ser considerado apropriado para diferentes cenários de demandas, dentro de cada período. Dentro de cada período existe uma matriz de fluxo que leva em conta a média de fluxo do período em consideração, bem como um gráfico de adjacência. O modelo considera custos de movimentação de materiais e de rearranjo, porém assume custos de rearranjo fixos.

Ertay *et al.* (2006) utilizam a análise envoltória de dados e a análise hierárquica do processo para propor um modelo de *layout* que seja robusto frente às incertezas de demanda. A análise hierárquica do processo é utilizada para verificar o desempenho de variáveis qualitativas como a flexibilidade de *mix*, qualidade da produção e do produto. A análise envoltória de dados é utilizada para agrupar os dados quantitativos, a saber, custo de movimentação de materiais, escore de adjacência, proporção da forma, utilização de veículos e os qualitativos e gerar o *layout* final.

2.3.1.3 *Layout* Reconfigurável

Kochar e Heragu (1999) propõem um modelo que considera o rearranjo de máquinas, estações de trabalho e serviços de suporte em ambientes em que não é possível modelar o fluxo de materiais num período longo. Consideram que os dados de alterações na demanda e no *mix* (novos e antigos produtos) geram a revisão das matrizes de fluxo de materiais e das matrizes de adjacência de um período para outro. Estas matrizes, juntamente com o projeto de *layout* atual, auxiliam na busca pela minimização do custo da movimentação de materiais e os custos de rearranjo, determinando o novo projeto de *layout*. O produto final é a localização das máquinas e o plano dos fluxos de materiais.

O trabalho de Meng *et al.* (2004) operacionaliza o modelo de Kochar e Heragu (1999) e insere o caráter estocástico no modelo. De acordo com Meng *et al.* (2004), o *layout* reconfigurável se distingue do tradicional, do robusto e do dinâmico devido a dois aspectos. Primeiro, ao assumir que os dados de produção estão disponíveis apenas para o período atual e o próximo período de produção. Segundo, ao considerar o desempenho das filas, o trabalho em processamento e o *lead time* na função objetivo do problema. A metodologia apresentada pelos autores parte da observação da seqüência de processamento e dos tempos de chegada dos produtos no sistema de manufatura atual, e gera *layouts* candidatos e matrizes de distância para cada *layout* candidato. Para cada *layout*, se calculam as medidas de desempenho, como os custos de movimentação de materiais e de rearranjo (determinístico), o tempo médio em fila, o comprimento médio da fila e o WIP (estocástico). O *layout* final é escolhido através de uma combinação dos custos do WIP, da movimentação de materiais, da penalização por atraso e do rearranjo associado a um vetor de custo unitário. A medição do vetor de custo é genérica; entretanto, as unidades de custo são específicas de cada empresa, refletindo políticas de recursos do sistema, políticas de controle e estratégias de gerenciamento. Por último, os autores sugerem que se aplique o *layout* escolhido a um sistema de manufatura real para que se refinem as pequenas imperfeições.

2.3.1.4 *Layout* Distribuído

Para Benjaafar *et al.* (2002), o *layout* distribuído é um dos tipos de *layouts* pertencentes à nova geração, juntamente com o *layout* modular e o *layout* ágil.

Em um *layout* distribuído as máquinas do mesmo tipo não são agrupadas em conjunto, como num *layout* por processo, e sim, distribuídas individualmente ou em grupo pela instalação. A distribuição de departamentos similares pela instalação aumenta a

acessibilidade de diferentes regiões a estes departamentos que, por sua vez, diminui as distâncias percorridas pelos materiais.

A diferença entre o *layout* celular e o *layout* distribuído, é que o primeiro se baseia em famílias de peças, cujos *layouts* são projetados para atender a famílias específicas e o segundo é projetado para atender a produção de forma geral. Na presença de flutuações muito grandes na demanda de produtos existentes ou com a freqüente introdução de produtos novos, o *layout* celular pode se tornar extremamente ineficiente. Para ambientes altamente voláteis, alguns autores têm sugerido *layouts* completamente distribuídos, em que cópias de determinadas máquinas são dispersas por todo o chão-de-fábrica, chamando-o de *layout* holográfico ou holônico (BENJAAFAR E SHEIKHZADEH, 2000). Entretanto, ao distribuir um *layout*, ou seja, duplicar departamentos inteiros ou máquinas isoladas e distribuí-los pelo chão-de-fábrica, uma instalação passa por diversas e grandes mudanças. Deve-se buscar responder quais departamentos serão subdivididos, quantos departamentos iguais serão mantidos, qual será a capacidade de cada departamento, como a carga a cada departamento será alocada, como as variáveis de desempenho operacional serão afetadas pela distribuição, como o aumento dos roteamentos será gerenciado, como as necessidades competitivas de departamentos similares serão gerenciadas, como os níveis de desempenho do *layout* serão medidos, entre outras questões. Pode-se, por um lado, aumentar a flexibilidade, e por outro, diminuir as economias de escala (BENJAAFAR *et al.*, 2002).

Benjaafar e Sheikhzadeh (2000) projetam um *layout* que desempenhe bem num conjunto finito de cenários, que resolva para cada cenário a alocação ótima entre o fluxo dos diversos departamentos, considerando um ambiente estocástico, sujeito a variabilidade no *mix* e na demanda dos produtos. As demandas dos produtos podem ser independentes ou estar correlacionadas e são caracterizadas por distribuições com dados históricos ou de previsão. Assume-se que o conjunto de produtos produzidos na instalação, a seqüência de departamentos visitados pelos produtos, a unidade de transferência de carga e a distância entre os departamentos, o número de cópias e as operações executadas em cada departamento, o conjunto de localizações disponíveis, o tempo médio de processamento de cada produto e o conjunto de cenários de demanda com suas probabilidades associadas sejam conhecidos. O modelo parte de uma matriz de fluxo para cada cenário. Num segundo momento, busca o *layout* ótimo baseando-se na localização dos departamentos e no volume de fluxo entre cópias do mesmo departamento, com o objetivo de minimizar o custo de movimentação de materiais. Os autores concluem que existem vantagens em duplicar departamentos/ máquinas e distribuí-los pelo chão-de-fábrica, principalmente no que se refere à diminuição dos custos de

movimentação. A maioria dos benefícios alcançados pela duplicação de departamentos são alcançados com poucas réplicas de alguns departamentos, o que significa que raramente se necessita de uma desagregação total de todos os departamentos funcionais. Argumentam, também que, com a duplicação dos departamentos, os lotes podem ficar menores, os *setups* podem ficar mais freqüentes e longos, a sincronização das bateladas pode ficar prejudicada, a infra-estrutura pode ser alterada, o que exige alterações na função objetivo proposta.

Lahmar e Benjaafar (2005) estendem o modelo e a solução de Benjaafar e Sheikhzadeh (2000) para períodos múltiplos, onde o *layout* pode ser reconfigurado a certo custo no início de cada período. Verificam o impacto da desagregação e da distribuição dos departamentos nos custos totais, variando níveis de movimentação de materiais, custo do rearranjo do *layout*, número de períodos de planejamento, variedade de produtos e variabilidade da demanda.

Balakrishnan e Cheng (2009) enfocam o aumento de flexibilidade e do desempenho de *layouts* distribuídos. Complementam que a escolha entre diferentes graus de distribuição do *layout* depende da análise de custo-benefício entre tempo de filas e tempo de movimentação dos materiais. Se por exemplo, a opção for um *layout* completamente distribuído (holônico), existe a probabilidade de reduzir o movimento, mas os tempos de fila serão maiores.

2.3.2 Indicadores de layouts em ambientes dinâmicos

Nesta seção, optou-se por realizar uma análise descritiva dos indicadores da literatura e seus autores, conforme Tabela 12. Observou-se que a maioria dos trabalhos trazem princípios quantitativos apresentam extensas deduções, definem sua própria nomenclatura e adaptam seu raciocínio às equações (1) e (2). A subdivisão dos princípios de avaliação de *layouts* em ambientes dinâmicos é embasada em Benjaafar *et al.* (2002).

Tabela 12: Princípios de avaliação de *layout* em ambientes dinâmicos

Princípio	Dados de entrada	O que determina	Autor
Eficiência da movimentação de materiais	<i>Mix</i> de produtos, volumes de produção atuais, demanda futura, número de movimentações e índice de priorização de produtos.	Melhor seqüência de operações que minimiza o custo anual de movimentação de materiais	Webster e Tyberghein, 1980
Robustez	<i>Mix</i> de produtos, seqüência de processamento, diferentes níveis de demanda para cada produto (alto, mais provável e baixo), possíveis localizações dos departamentos, distância e custo de transporte unitário entre os mesmos. Periodicidade entre trocas de <i>layout</i> , variação percentual de peças produzidas, de volume e de roteamentos diferentes. Matrizes de fluxo e de adjacência e localização das máquinas (largura e profundidade).	Indica um <i>layout</i> que é representado por um vetor e cujo cenário (saída possível) tem um custo de movimentação de materiais. A análise de cada cenário é desenvolvida utilizando teoria de Laplace, regressão Minimax e medição Robusta. O custo esperado de cada <i>layout</i> assume igual probabilidade de ocorrência em cada cenário e procura o número de vezes que o <i>layout</i> fica dentro da solução ótima. Simula como os dados de entrada impactam no número de máquinas, número de peças, roteamento das peças, volume de peças produzidas em cada período, estabilidade de volume no tempo e freqüência de alterações no portfólio das peças. Indica se ao final de determinado período (janela móvel), o <i>layout</i> deve ser rearranjado ou se os custos de movimentação compensam o custo do rearranjo.	Rosenblatt e Lee, 1987 Afentakis <i>et al.</i> , 1990 Yang e Peters, 1998
Eficiência da movimentação de materiais e robustez	Dados da literatura (matrizes de fluxo e de adjacência)	Desenvolve uma função objetivo ponderada em que enfoca que a eficiência de movimentação de materiais tem duas parcelas de custo: uma variável e outra Fixa. Os custos variáveis representam o tempo de espera para obter o material, o método de movimentação, o tempo de retirada e de entrega do bem. O custo fixo representam as distâncias percorridas. A robustez é representada pelas várias ponderações de interesse.	Meller e Gau, 1996b
Combinação de média e variância	Dados da literatura (<i>mix</i> de produtos, volumes (média e desvio padrão), seqüência de processamento, área disponível)	Determina, para cada probabilidade de ocorrência, os custos de movimentação de materiais (valor, média e desvio padrão) e em função disto escolhe o <i>layout</i> mais apropriado.	Norman e Smith, 2006
Desempenho operacional	<i>Mix</i> de produtos, matrizes de fluxo, seqüência de processamento, demanda, tamanho de batelada, área disponível, tempo de processamento, <i>setup</i> para cada batelada, velocidade do elevador de carga e número de máquinas. Mix de produtos, matrizes de fluxo, seqüência de processamento, demanda, tamanho de batelada, área disponível, tempo de processamento, <i>setup</i> para cada batelada, velocidade do elevador de carga, tempo de viagem vazio e número de máquinas. <i>Mix</i> de produtos, seqüência de processamento, taxa de chegada, <i>layout</i> e maquinário atual, restrições, matriz de distâncias	Utiliza a simulação para modelar as filas como ponto inicial para investigar a relação entre os custos de movimentação de materiais e o <i>work-in-process</i> . Também verifica a dependência primária entre <i>layout</i> e sistema de movimentação. Discute a utilização da equação (1) para melhorar o <i>layout</i> e reduzir o <i>work-in-process</i> . Escolhe o <i>layout</i> adequado através de um vetor de custo unitário composto pelo <i>work-in-process</i> , pelos custos de movimentação de materiais, pelo custo da penalização por atraso e pelo custo mínimo de realocação de cada máquina.	Fu e Kaku, 1994 Benjafaar, 2002 Meng <i>et al.</i> , 2004

Fonte: elaborado pela autora (2009)

Segundo Raman *et al.* (2009a), entretanto, a função objetivo que a maioria dos autores anteriores usa leva em conta apenas a minimização dos custos de movimentação e os custos do *re-layout*. Embora a minimização dos custos de movimentação seja primordial e importante, existem outros fatores reais para medir a flexibilidade do *layout*. Assim sendo, os

autores medem a efetividade do *layout* de uma instalação, conforme pode ser observado no esquema apresentado na Figura 10.

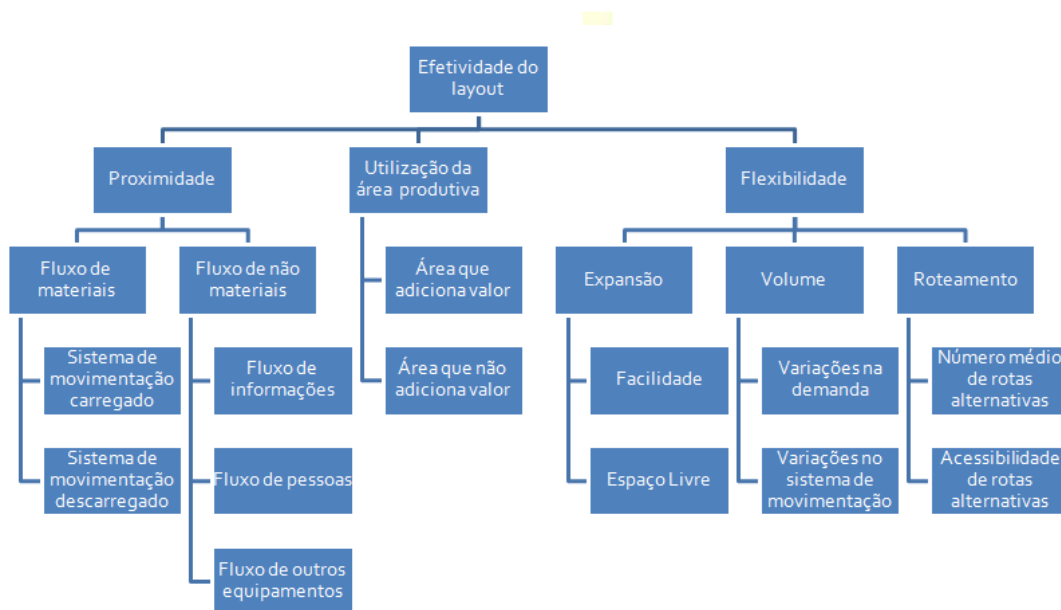


Figura 10: Efetividade do *layout*
Fonte: Raman *et al.* (2009a)

Para Raman *et al.* (2007, 2009a), a proximidade entre departamentos verifica o grau de proximidade de departamentos cuja adjacência é necessária, pois o objetivo é reduzir as distâncias para minimizar os custos de movimentação e os tempos de produção. É verificado através do fluxo de materiais e de não materiais que ocorre dentro e entre os departamentos de uma instalação. Para tal, os autores determinam as peças/produtos que são produzidos, a seqüência de processos/operações, a quantidade demandada, o tamanho do lote e a distância dos outros processos/operações, criam um índice que mede este grau e o inserem na fórmula de efetividade do *layout*.

A utilização da área produtiva verifica a ocupação de maneira efetiva das áreas de máquinas, de ferramentas, de estocagem, de transporte de materiais e áreas inativas com atividades que adicionam valor ou não. Raman *et al.* (2007, 2009a) utilizam a análise hierárquica do processo (AHP), geram um índice e o inserem na fórmula de efetividade do *layout*.

Os tipos de flexibilidade de manufatura que impactam diretamente no *layout*, para Raman *et al.* (2005, 2009a), são a flexibilidade de expansão, de volume e de roteamento. A primeira tem relação direta com a existência e a facilidade de ter espaços livres. A segunda se relaciona com as variações de volume que o *layout* suporta. A terceira verifica a existência de

operações/máquinas alternativas e acessíveis para produzir uma determinada peça/produto. Para calcular o índice de flexibilidade do *layout* que é inserido na fórmula de efetividade do *layout*, os autores utilizam um sistema baseado em regras *fuzzy* (DWEIRI, 1999; DEBA E BHATTACHARYY, 2005).

Ao final, os três fatores são integrados sendo que cada parcela acima é multiplicada pelo peso de importância e se obtém a efetividade do *layout*.

2.4 COMENTÁRIOS FINAIS

Para propor uma sistemática de avaliação da flexibilidade de *layout*, deve-se determinar o que torna um *layout* flexível, capaz de reagir às incertezas que surgem.

Tradicionalmente, analisando a literatura de *layout*, devem-se focar fatores de proximidade e de adjacência entre os departamentos, pois aumentam a eficiência da movimentação de materiais, o que reduz custos operacionais. Matematicamente, sua função objetivo é representada pelas equações (1) e (2), respectivamente equações de minimização de distâncias e de maximização das adjacências.

Ao analisar a literatura sobre avaliação de *layout*, aqui representada pelos trabalhos de Lin e Sharp (1999a; 1999b) sumarizados nas Tabelas 9 e 10, verifica-se que em termos de *layout*, os principais critérios, que apresentam dificuldades de mensuração são fluxo e ambiente. O fluxo está subdividido em três classes: relacionado ao espaço, ao fluxo de materiais e à robustez e flexibilidade. O ambiente está subdividido em duas classes: relacionada à adjacência e à qualidade do ambiente. Ao mesmo tempo em que os critérios confirmam as equações (1) e (2), eles também antecipam a necessidade de robustez e flexibilidade, e sugerem verificar suficiência e utilização do espaço de máquinas, de armazenamento, para as necessidades pessoais, de corredores e movimentação pessoal, entre outros.

Detalhando sob o aspecto da flexibilidade de manufatura, se explicita o contexto histórico que gera a necessidade de tornar-se flexível. Nas definições do termo, busca-se entender as dimensões para as quais podem ser expandidas a maioria dos objetos de variação da flexibilidade de manufatura, busca-se entender as formas de mensuração e também a dependência entre um objeto e outro. Dois trabalhos importantes, dentre muitos, são Sethi e Sethi (1990) e Koste e Malhotra (1999). Sethi e Sethi (1990) propõem a existência de flexibilidades básicas (de componentes) na base de um sistema de manufatura. Koste e Malhotra (1999) agrupam os tipos de flexibilidade de manufatura nos níveis da planta, do

chão-de-fábrica e dos recursos individuais, basicamente incorporando o componente das incertezas internas e externas.

Sob o enfoque da flexibilidade de *layout*, foram analisados os trabalhos de Webster e Tyberghein (1980), Hassan (1994), Benjaafar e Ramakrishnan (1996) e Yang e Peters (1998), acrescentando posteriormente o trabalho de Meng *et al.* (2004), entre outros. Esses trabalhos ajudam a explicitar a lógica de que parte da flexibilidade de *layout* é devida a fatores primários de associação com outros tipos de flexibilidade de manufatura. A intersecção desses trabalhos com a problemática da nova geração de *layouts* (MENG *et al.*, 2004) é representada pela Figura 8, resultando na proposição da associação entre os tipos de flexibilidade de manufatura e o *layout*. De acordo com a problemática da nova geração de *layouts*, dado que existe um *mix* de produtos, determina-se o roteamento de acordo com as máquinas disponíveis e se propõe uma localização adequada, proveniente de um estudo de *layout*. A intersecção destes dois campos ocorre no momento em que as incertezas externas e internas obrigam alterar a localização de máquinas e utilidades, ao mesmo tempo em que se desejam evitar rearranjos muito freqüentes, tornando-se então um problema estratégico da organização. Conforme já foi explanado anteriormente, um estudo de *layout* deseja minimizar perdas e esforços, representados pela equação (1) e (2). Recentemente, o trabalho de Raman *et al.* (2005, 2007, 2009a) sintetiza estas idéias integrando o componente da flexibilidade de manufatura para medir a efetividade de um *layout*, ao mesmo tempo em que considera fatores tradicionais de avaliação de um bom *layout*. Enquanto o trabalho de Raman *et al.* (2005, 2007, 2009a) mensura a efetividade de um *layout* utilizando uma parcela denominada flexibilidade de *layout*, neste trabalho, por considerar conjuntamente os trabalhos de Lin e Sharp (1999a; 1999b), Meng *et al.*, 2004 e Benjaafar *et al.* (2002), entende-se que em vez de efetividade poder-se-ia ter o objetivo de determinar unicamente a flexibilidade de um *layout*.

O Capítulo 3 apresenta a construção de uma sistemática de avaliação e melhoria de flexibilidade de *layout* que contempla a análise simultânea de fatores de proximidade de departamentos, de utilização de área e de associação com outros tipos de flexibilidade de manufatura, características desejáveis de instalações inseridas em ambiente dinâmicos e voláteis.

3 CONSTRUÇÃO DA SISTEMÁTICA PARA AVALIAÇÃO E MELHORIA DE FLEXIBILIDADE DE *LAYOUT* EM AMBIENTES DINÂMICOS

Observando-se a Figura 2 e tomando-se um cenário específico de uma instalação que necessite de maior flexibilidade, independente do tipo de flexibilidade necessitada, fica claro o dinamismo e as peculiaridades de cada sistema de manufatura em termos de efeito da incerteza, flexibilidades requeridas e *buffers* atuantes. Assim sendo, a combinação dos elementos pode dar-se de modos e em quantidades diferentes; por isso a necessidade de cenários específicos de aplicação.

Em relação à flexibilidade de *layout*, também se pode conceber um sistema semelhante, com a atuação de incertezas externas e internas, e seus efeitos, conforme a Figura 11. Para que o sistema fique em equilíbrio, espera-se um grau de flexibilidade do *layout* compatível com as incertezas atuantes. No centro de apoio deste sistema se encontram *buffers* específicos que proporcionam equilíbrio a este sistema. A flexibilidade de um *layout* é representada pela variedade de pequenos rearranjos de *layout* que podem realizados com baixas penalidades em custos, para absorver incertezas. Baixas penalizações em termos de custos, por sua vez, significam minimização de perda de tempo e de esforços, e maximização de desempenho ao efetuar mudanças. Em termos de custo, consideram-se tanto o custo de movimentação das máquinas quanto o custo de produção perdida (horas paradas, redução de produtividade, etc). As incertezas podem ser decorrentes de acontecimentos, tais como: mudança de *mix* de produto, descontinuidade ou alteração de níveis de demanda, quebra de máquinas, absenteísmo elevado da força de trabalho, necessidade de alteração das características técnicas do sistema de movimentação, exigência de produtos com novas características físicas, técnicas, etc. Ao que parece, a flexibilidade de *layout* gera um *layout* onde alguns rearranjos continuarão a ser rotineiros, porém serão efetivados com esforços menores. Outros rearranjos irão exigir esforços especiais, dependentes do tempo para execução, grau de planejamento e quantidade de recursos humanos, infra-estruturais e econômicos envolvidos.

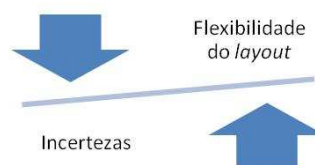


Figura 11: Flexibilidade do *layout*
 Fonte: adaptado de Newman *et al.* (1993)

3.1 DETERMINAÇÕES PRELIMINARES

Em primeiro lugar, deve-se explicar a escolha dos termos ‘avaliação’, ‘flexibilidade’ e ‘layout’.

Optou-se por desenvolver uma sistemática de ‘avaliação’ pois se verificou que a literatura na área de avaliação de *layout* não é muito extensa, sendo representada por poucos autores; entre eles, é consenso que se deve planejar e avaliar uma situação antes de efetivar as alterações fisicamente. Além disso, a sistemática auxilia a avaliar as potencialidades de um *layout*, compara diferentes alternativas e prioriza as mesmas de acordo com critérios previamente estabelecidos. A sistemática propõe avaliar os indicadores na própria instalação, de forma metodológica, indicando aqueles majoritariamente impactantes no atual nível macro e micro (LEE, 1998). Em algumas situações, pode ocorrer a impossibilidade de efetivar algumas melhorias no *layout* atual, seja por relações desfavoráveis de custo e benefício ou porque o indicador não permite melhoria. Nesses casos, as decisões de melhoria de flexibilidade do *layout* podem estar condicionadas a determinar um novo prédio, ou seja, a uma decisão de nível supra.

Optou-se por utilizar o termo ‘flexibilidade’, pois o mesmo é utilizado pelos autores de *layout* para focar *layouts* em ambientes dinâmicos, associados às características e requisitos dos tempos modernos. Entretanto, poderia se utilizar conjuntamente, sem prejuízo do sentido do termo, as expressões ‘dinamicidade, reconfigurabilidade, robustez, distribuição’, entre outras. O termo flexibilidade foi adotado principalmente por não ser comum, na literatura de flexibilidade de manufatura, encontrar o objeto de variação ‘*layout*’. Entende-se que a flexibilidade de *layout* pode ser parcialmente atribuída a associação com os outros tipos de flexibilidade de manufatura, os quais, já podem estar sendo medidos e monitorados na instalação.

Optou-se por utilizar o termo ‘*layout*’, pois o termo também é empregado num contexto mais amplo na literatura, quando significa ‘projeto de *layout* de instalações’ (FRANCIS *et al.*, 1992; TOMPKINS *et al.*, 1996; LEE, 1998), o que é o escopo da sistemática proposta. Os fatores primários de proximidade dos departamentos e de utilização de área são de aplicação mais restrita, mais tradicional do termo. O fator primário de associação com outros tipos de flexibilidade de manufatura é de aplicação mais ampla.

Em segundo lugar, para propor uma sistemática de avaliação da flexibilidade de *layout*, deve-se escolher um modelo matemático adequado. O modelo matemático utilizado nesta tese será parcialmente baseado em Fogliatto *et al.* (2003), que por sua vez se baseia na

lógica das matrizes de *Quality Function Deployment* (QFD); para um aprofundamento, ver Akao (1996) e Cohen (1995). Esse modelo foi escolhido pela possibilidade de integração dos três módulos de medição (associação com outros tipos de flexibilidade de manufatura, proximidade de departamentos e utilização de área) no mesmo modo de medição (matriz única) e pela simplicidade de aplicação prática, uma vez que os cálculos podem ser efetuados em planilha *excel* e o usuário necessita fornecer apenas pesos comparativos.

No trabalho de Fogliatto *et al.* (2003), os autores utilizam uma aplicação das matrizes de QFD e propõem um índice que estabelece a viabilidade da customização em massa de diferentes peças de um produto levando em conta requisitos do cliente, flexibilidade de entrega dos fornecedores e flexibilidade da produção. Inicialmente se listam as características do produto a serem customizadas, explicitando seu peso de importância para o cliente. Esses itens, por sua vez, são correlacionados a peças de produtos, que são posteriormente correlacionadas aos estágios da manufatura. Ao final se obtém um índice que ajuda a definir prioridades gerenciais e oportunidades de melhoria em termos de customização em massa das peças do produto.

Nesta tese, as principais adaptações que serão feitas no modelo de Fogliatto *et al.* (2003) dizem respeito à aplicação da ferramenta, uma vez que o modelo estabelece uma sistemática de avaliação de flexibilidade de *layout*. Esta sistemática propõe uma série de passos para avaliar quão flexível é um determinado *layout*, ao mesmo tempo em que gera índices únicos, de caráter mais gerencial. Na sistemática proposta, o usuário pode escolher se prefere trabalhar com as informações de forma comparativa ou com os índices gerais e melhorados. Outra adaptação diz respeito ao modelo matemático proposto, que utilizará um menor número de matrizes. No modelo dos autores a definição dos itens a serem customizados fica por conta do cliente, do fornecedor e da empresa; no modelo aqui proposto os fatores de flexibilidade são embasados na literatura e no conhecimento dos pesquisadores. No modelo proposto, a empresa apenas pondera o peso dos fatores secundários e terciários na árvore de flexibilidade de *layout* utilizando planilha *excel*.

A sistemática proposta para avaliação e melhoria da flexibilidade de *layout* é constituída de dez etapas, apresentadas na Figura 12. Conforme pode ser observado, as etapas VI à VIII podem ser desenvolvidas concomitantemente, uma vez que a interpretação dos resultados e a proposição de melhorias depende de relações de custo benefício entre o real e o melhorado. Em termos práticos, periodicamente o usuário pode reelaborar apenas a árvore de flexibilidade de *layout*, sem alterar a matriz de flexibilidade de *layout*, desde que verifique o

status dos indicadores efetivando uma nova medição. O detalhamento das etapas é apresentado nas seções que se seguem.

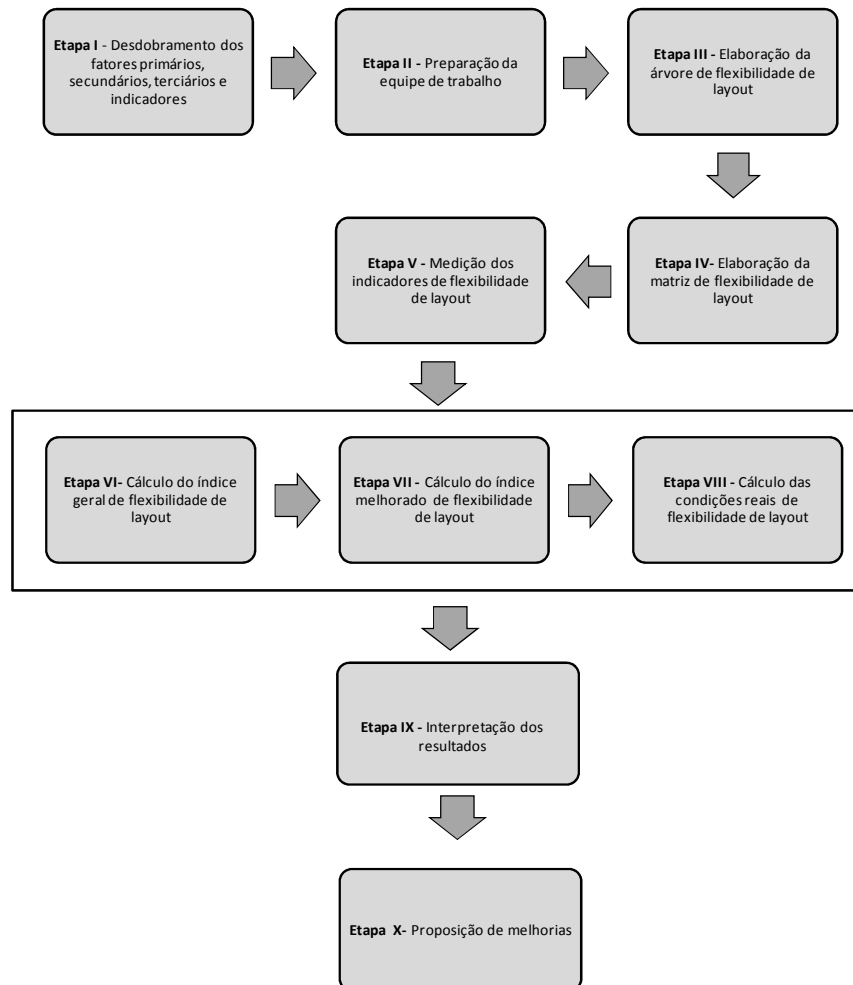


Figura 12: Etapas da sistemática para avaliação e melhoria da flexibilidade de *layout* em ambientes dinâmicos

Fonte: elaborado pela autora (2009)

3.2 ETAPA I – DESDOBRAMENTO DOS FATORES PRIMÁRIOS, SECUNDÁRIOS, TERCIÁRIOS E INDICADORES

Nesta etapa se identificam os fatores, classificados como primários, secundários e terciários, que têm influência sobre a flexibilidade de *layout*. Associado a cada fator terciário existe um conjunto de indicadores, conforme esquema apresentado na Figura 13.

Fator primário (F1 _m)	Fator secundário (F2 _n)	Fator terciário (F3 _i)	Indicadores (I _j)
F1 _m	F2 ₁	F3 ₁	
		F3 ₂	
		F3 ₃	
	F2 ₂	F3 ₄	
		F3 ₅	
		F3 ₆	

Figura 13: Estrutura genérica de fatores e indicadores
 Fonte: elaborado pela autora (2009)

Neste trabalho, a estrutura de fatores primários utilizados é a mesma de Raman *et al.* (2009a), conforme pode ser observado na Figura 14. Assim sendo, são utilizados três fatores primários: a proximidade dos departamentos, a utilização da área produtiva e a associação com outros tipos de flexibilidade de manufatura que impactam diretamente no *layout*. Os motivos já foram previamente explicitados na seção 2.4.

A estrutura de fatores secundários e terciários é, contudo, diferente daquela proposta por Raman *et al.* (2009a). Entende-se que todos os fatores e indicadores podem ser medidos de forma quantitativa, mesmo que isto represente mensurá-los em termos de proporção ou grau em relação a um todo/alvo (ou seja, de forma indireta) em alguns casos. Diferentemente de Raman *et al.* (2009a) – que utilizou verificação de fluxo de peças para medir proximidade de departamentos, AHP para medir a utilização da área produtiva e lógica *fuzzy* para medir os tipos de flexibilidade importantes – neste trabalho se utiliza a mesma ferramenta de avaliação para todos os fatores. Para tanto, se utiliza uma única matriz de correlação entre fatores terciários (que estão nas linhas) e indicadores (que estão nas colunas), sendo que os indicadores oferecem medições para um ou muitos fatores terciários, representados por sua intensidade de relacionamento. Complementarmente, todos os indicadores são avaliados em relação a um alvo, para determinar o quanto já se atingiu do ótimo de um determinado indicador e quanto ainda se poderia obter. Por fim, complementando a literatura estudada [Webster e Tyberghein (1980), Hassan (1994), Benjaafar e Ramakrishnan (1996), Yang e Peters (1998) e Raman *et al.* (2009a)], entende-se que os tipos de flexibilidade associados ao *layout* podem ser ampliados para contemplar não somente a flexibilidade de expansão, de volume e de roteamento na determinação da flexibilidade de *layout*, mas também os tipos de

flexibilidade básicas (de componentes) e outras mais relacionadas com o ambiente externo, como flexibilidade de *mix* e de mercado (novos produtos).

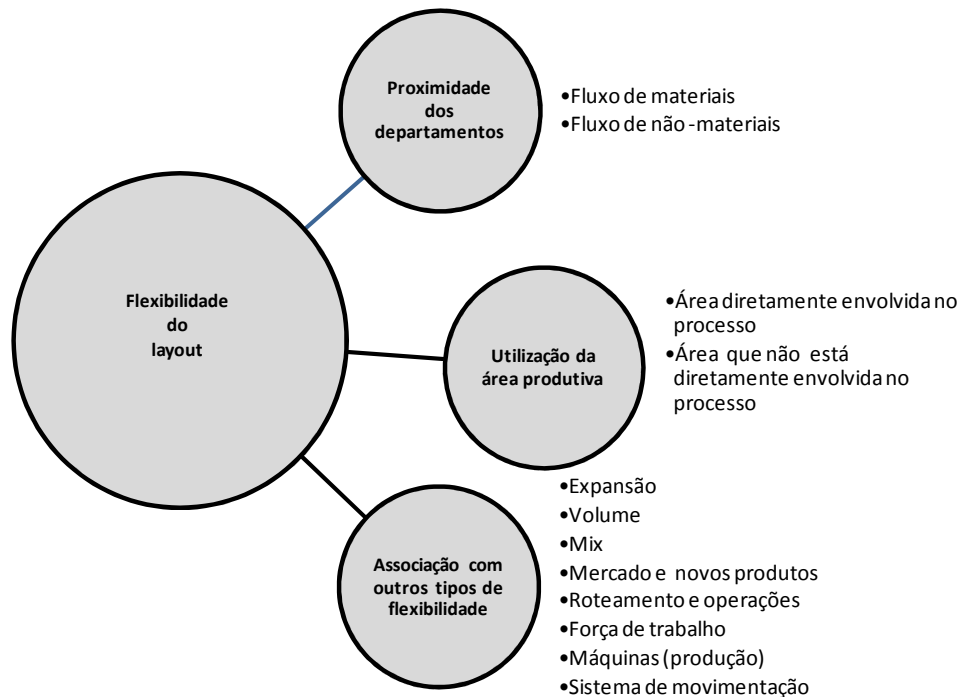


Figura 14: Estrutura de fatores primários e secundários

Fonte: adaptado de Raman *et al.* (2009a)

Os fatores nos três níveis de ponderação são observados na Figura 15. Ao todo são concebidos 12 fatores secundários, 33 fatores terciários e 50 indicadores. A estrutura de fatores primários, secundários, terciários e indicadores não pode ser alterada pelo usuário (que deseja avaliar a flexibilidade de seu *layout*), para evitar distorções dos relacionamentos destes fatores com os indicadores. Admite-se apenas alterar o peso de importância de cada fator secundário e terciário na composição do valor total, o que é descrito em detalhes na etapa III.

A seguir, a estrutura de fatores será descrita detalhadamente e alguns indicadores serão exemplificados.

Fator primário (F1 _m)	Fator secundário (F2 _n)	Fator terciário (F3 _i)
Proximidade dos departamentos	Fluxo de materiais	Adequação de fluxo de materiais intra
		Adequação de fluxo de materiais inter
	Fluxo de não-materiais	Adequação do sistema de movimentação
		Adequação do fluxo de pessoas
Utilização da área produtiva	Área diretamente envolvida no processo	Adequação do fluxo de informações (papéis)
		Utilização da área de máquinas
	Área que não está diretamente envolvida no processo	Utilização da área de armazenamento
		Utilização da área de espera e movimentação
Associação com outros tipos de flexibilidade de manufatura	Expansão	Utilização da área de transporte
		Existência de restrições de área (colunas, elevadores, paredes, escadas, circulação)
		Existência de áreas desperdiçadas (mal usadas)
	Volume	Existência de área reservada para expansão
		Existência de configurações modulares
		Amplitude de variação de capacidade
	Mix	Adaptabilidade do sistema produtivo
		Acuracidade da previsão de demanda
		Amplitude do mix de produtos
	Mercado e novos produtos	Heterogeneidade do mix de produtos
		Desempenho do mix de produtos
		Amplitude de lançamento de novos produtos
	Roteamento e operações	Heterogeneidade de lançamento de novos produtos
		Demandas dos clientes (rapidez, confiabilidade e custos)
		Amplitude de rotas alternativas
	Força de trabalho	Heterogeneidade de rotas alternativas
		Quantidade de erros de qualidade causadas pelas operações
		Amplitude de tarefas que um operador pode efetuar
	Máquinas (produção)	Heterogeneidade das tarefas que um operador pode efetuar
		Amplitude das máquinas
Heterogeneidade das máquinas		
Sistema de movimentação	Desempenho das máquinas	
	Amplitude de caminhos do sistema de movimentação	
	Heterogeneidade do que é movimentado pelo sistema de movimentação	
		Desempenho do sistema de movimentação

Figura 15: Listagem de fatores primários, secundários e terciários definidos

Fonte: elaborado pela autora (2009)

3.2.1 Análise do fator primário proximidade dos departamentos

A proximidade dos departamentos é subdividida em duas classes de fatores secundários, conforme pode ser observado na Figura 15; a saber: (i) relacionados ao fluxo de materiais, e (ii) relacionados ao fluxo de não materiais.

Segundo Lee (1998), a análise do fluxo de materiais visa apontar oportunidades de melhoria na movimentação de materiais e evidencia problemas acentuados de cruzamentos de fluxo e distâncias excessivas para produção, gerando subsídios para a tomada de ações. De forma prática, as informações da análise dos processos são sobrepostas no espaço atual, gerando um diagrama que evidencia os fluxos de materiais que ocorrem no *layout*. Podem-se mapear tipos de materiais que são movimentados, formas de transporte utilizadas e volumes de fluxos existentes. Lee (1998) também observa que existem fluxos de não materiais subjetivos e difíceis de quantificar. Exemplos desses fluxos são a movimentação de pessoal

para áreas de apoio, *feedbacks* de análises de qualidade, fluxo de informações e comunicação interpessoal, entre outros.

Como fatores terciários de fluxos de materiais são considerados: (i) adequação de fluxo de materiais intra; (ii) adequação de fluxo de materiais inter; e (iii) adequação do sistema de movimentação.

A adequação de fluxo de materiais intra restringe a análise ao espaço interno de uma célula ou departamento funcional e aos postos de trabalho que os compõem. Em outras palavras, faz-se uma análise no nível do micro-espaço (LEE, 1998). Observa-se que o micro espaço é fortemente afetado por padrões de movimentação de materiais internos e externos, pontos de entrada e saída dos materiais, formas de controle da produção e da garantia da qualidade, tamanhos de lote, motivação dos operadores e formas de supervisão e gerenciamento (LEE, 1998). Os indicadores utilizados para medir a adequação de fluxo de materiais intra são a razão da distância ideal/real para produzir um produto típico, razão do número de cruzamentos de fluxos ideal/real, proporção de máquinas duplicadas, de pequeno porte e multifuncionais, entre outros exemplos.

A adequação de fluxo de materiais inter verifica o fluxo entre células ou entre departamentos funcionais diferentes, avaliando distâncias, tempos, índices de valor agregado (percentual de operações que agregam valor), cruzamentos e adjacências. No trabalho de Gupta e Tompkins (1982) foi verificado que o número de movimentos inter é significativamente menor quando se utilizam células maiores, em comparação com células menores. De acordo com Lee (1998), inicialmente é realizada uma análise do macro espaço. Os indicadores que medem a adequação de fluxo de materiais inter são a proporção de departamentos com adjacência correta, a proporção de máquinas duplicadas, com *setup* otimizado e com operações otimizadas, o grau de frequência de rearranjo, a proporção de área servida por corredores e a proporção de área servida pelo sistema de movimentação, entre outros exemplos.

Através da análise da adequação do sistema de movimentação verifica-se como o mesmo auxilia, simplifica e determina o fluxo dos materiais. O *layout* e o sistema de movimentação devem ser integrados (TOMPKINS *et al.*, 1996; RAMAN *et al.*, 2009b; IOANNOU E MINIS, 1998). Os indicadores que verificam a adequação do sistema de movimentação são a proporção de máquinas que são interligadas, a proporção de área servida pelo sistema de movimentação e a proporção de tempo inoperante das máquinas (que está relacionada a congestão, manutenção, programação), entre outros exemplos.

Como fatores terciários de fluxos de não materiais são considerados: (i) adequação de fluxo de pessoas; e (ii) adequação do fluxo de informações.

Através da análise da adequação do fluxo de pessoas verifica-se se as pessoas que necessitam compartilhar informações e recursos físicos estão próximas, ao mesmo tempo em que obedecem ao fluxo de processo/serviço (LEE, 1998). Os indicadores que verificam a adequação do fluxo de pessoas são a razão da distância ideal/real para produzir um produto típico e a razão do número de cruzamentos de fluxos ideal/real, entre outros exemplos.

Através da análise da adequação do fluxo de informações (papéis), verifica-se se este fluxo foi mapeado, se é compreendido pelos envolvidos e, principalmente, se é obedecido (LEE, 1998). Os indicadores que verificam a adequação do fluxo de informações são o grau de adequação do sistema de produção ao volume de produção e a proporção de processos mapeados, entre outros.

3.2.2 *Análise do fator primário utilização da área produtiva*

A utilização da área produtiva é subdividida em duas classes de fatores secundários, conforme ilustrado na Figura 15 que são: (i) utilização da área diretamente envolvida no processo; (ii) utilização da área que não está diretamente envolvida no processo.

A área diretamente envolvida no processo tem relação direta com as áreas que realizam/dão suporte às operações, que são responsáveis pelo aumento de valor agregado, que de forma geral cooperam com as operações. A utilização da área que não está diretamente envolvida no processo tem relação com áreas de transporte, movimentação e áreas com restrições de uso, áreas que podem dar suporte à área produtiva propriamente dita, mas não agregam valor à produção.

Como fatores terciários de utilização da área diretamente envolvida no processo são considerados a: (i) utilização da área de máquinas; e (ii) utilização da área de armazenamento.

A análise da utilização da área de máquinas verifica como a mesma é utilizada levando em conta a inserção desta área no sistema produtivo como um todo. Assim sendo, o tipo de *layout*, o tamanho de lote, o sistema de inspeção/qualidade, para dar alguns exemplos, influenciam na forma de utilização da área de máquinas. Os indicadores que verificam a utilização da área de máquinas são a proporção de área produtiva, a proporção de área sem restrições, o grau de frequência de rearranjo das máquinas e a proporção do *mix* que é produzido na planta, entre outros exemplos.

A utilização da área de armazenamento verifica como a instalação ocupa suas áreas de almoxarifado de matérias-primas, de produtos em processamento e de produtos acabados, e quais são os procedimentos/métodos adotados para colocar/retirar itens no/do armazenamento. A análise destas áreas pode ser complexa; para um aprofundamento, ver Baker e Canessa (2009). Os indicadores que verificam a utilização da área de armazenamento são a proporção da produção para atender pedidos programados e a proporção de área de armazenamento, a proporção da produção *Just in time*, entre outros exemplos.

Como fatores terciários de utilização da área que não está diretamente envolvida no processo são tomados a: (i) utilização da área de espera e movimentação; (ii) utilização da área de transportes; e (iii) existência de restrições de área. Todos esses indicadores verificam a existência de áreas que são mal utilizadas, pois, a rigor, o processo poderia ser otimizado e estas áreas poderiam ser transformadas em áreas que agregam valor.

Como indicadores da utilização da área de espera e movimentação, são utilizados a proporção de pedidos atendidos, a proporção da produção para atender pedidos programados, a proporção de máquinas que são interligadas pelo sistema de movimentação e a proporção de contenedores multiuso, entre outros exemplos.

Como indicadores da utilização da área de transportes são utilizados a proporção de contenedores multiuso, a proporção de área servida por corredores e a proporção do *mix* que é produzido na planta, entre outros exemplos.

Como indicadores da existência de restrições de área são utilizados a proporção da área servida por corredores, a proporção de departamentos com forma geométrica adequada, a proporção de departamentos com área adequada e a razão da distância ideal/real para produzir um produto típico, entre outros exemplos.

3.2.3 Análise do fator primário associação com outros tipos de flexibilidade

Por fim, a literatura também enfoca a capacidade de antecipar as necessidades futuras da produção no projeto de *layout* original (inicial) e nos rearranjos subsequentes. Externamente deve-se acompanhar o comportamento do mercado, dos fornecedores e dos clientes. Internamente deve-se proceder ao ajuste das máquinas, da força de trabalho e do sistema de movimentação. Essas duas visões, a interna e a externa, têm grande relação com os diferentes tipos de flexibilidade de manufatura. Tais idéias são contempladas no modelo ao medir os diferentes tipos de flexibilidade de manufatura que impactam na flexibilidade de *layout*, que formam a última classe de indicadores primários. As questões abordadas

envolvem classes de diferentes tipos de flexibilidades de manufatura, como, por exemplo, a flexibilidade de *mix*, de máquinas e de mercado, que geram as incertezas no *layout*, que podem ser observadas na Figura 15. Complementarmente, às definições dos diferentes tipos de flexibilidade de manufatura podem ser atribuídos fatores terciários em relação à amplitude (número e heterogeneidade de cada um dos objetos – máquina, roteamento, *mix*, etc.), mobilidade e uniformidade (UPTON, 1994, 1995, 1997; KOSTE E MALHOTRA, 1999 e 2000; KOSTE *et al.*, 2004).

A existência de áreas desperdiçadas (subutilizadas, cujo uso pode ser repensado) e a existência de área reservada para expansão futura são indícios de que, em termos de *layout*, existe possibilidade de que a instalação possa aumentar sua capacidade, instalar novas máquinas com menor esforço e expandir (LIN E SHARP, 1997a). Como indicadores são utilizados o grau de frequência de rearranjos, as proporções das áreas de armazenamento e da área produtiva, a proporção da área servida pelos corredores e a proporção de departamentos com forma geométrica adequada, entre outros exemplos.

A existência de configurações modulares é outro fator terciário em termos de flexibilidade de expansão (KOSTE E MALHOTRA, 1999), pois instalações modulares suportam alterações com menores penalizações de transição em termos de custo e tempo. Como indicadores são utilizados o grau de facilidade de aumentar capacidade produtiva, a proporção de área servida pelo sistema de movimentação e a proporção de máquinas de pequeno porte, entre outros exemplos.

A amplitude representa o número de opções possíveis em termos de variação de capacidade, *mix* de produtos, de lançamento de novos produtos, de rotas alternativas (de diferentes roteamentos) que um produto pode ter, de tarefas que um operador pode efetuar, de máquinas disponíveis e de caminhos do sistema de movimentação. Como indicadores são utilizados a proporção do *mix* que é produzido na planta, a proporção de peças com rotas alternativas de processamento e a proporção de operadores multifuncionais, entre outros exemplos.

A heterogeneidade representa o grau de diferenciação, ou seja, o grau de variedade das opções em termos de *mix* de produtos, de lançamento de novos produtos, de rotas alternativas que um produto pode ter, de tarefas que um operador pode efetuar, de máquinas disponíveis e do que é movimentado pelo sistema de movimentação. Como indicadores são utilizados o grau de variedade do *mix*, proporção de departamentos formados por tecnologia de grupos, tempo de lançamento de novos produtos, grau de variação de volume e peso do sistema de movimentação, entre outros exemplos.

Os fatores terciários que medem a adaptabilidade do sistema produtivo, a acuracidade da previsão de demanda, as demandas dos clientes (rapidez, confiabilidade e custos), a quantidade de erros de qualidade causados pelas operações, o desempenho do *mix* de produtos, das máquinas e do sistema de movimentação se referem ao quesito uniformidade, ou seja, manter desempenho constante ao longo da efetivação da mudança e após seu término. Como indicadores são utilizados a proporção da área de armazenamento, a proporção de máquinas que são interligadas pelo sistema de movimentação, o grau de inovação dos novos produtos, o grau de qualidade dos produtos, entre outros exemplos.

3.2.4 Análise dos indicadores

A listagem dos indicadores medidos é observada na Figura 16 e sua forma de medição é verificada no Apêndice A. A intensidade de relacionamento dos fatores terciários com os indicadores são definidos na etapa IV.

Indicadores (I _j)
Grau de adequação do sistema de produção ao volume de produção
<i>Grau de facilidade de adequar o mix</i>
Grau de facilidade de aumentar capacidade produtiva
Grau de facilidade de estabelecer rotas alternativas
Grau de facilidade de lançar novos produtos
Grau de frequência de rearranjo
Grau de inovação dos novos produtos
Grau de qualidade dos produtos
Grau de similaridade entre os novos produtos e os antigos
Grau de variação de peso do sistema de movimentação
Grau de variação de volume do sistema de movimentação
Grau de variedade do <i>mix</i>
Proporção da produção <i>Just in time</i>
Proporção da produção para atender pedidos programados
Proporção da quantidade de novos produtos lançados
Proporção de área de armazenamento
Proporção de área disponível para expansão futura
Proporção de área produtiva
Proporção de área sem restrições
Proporção de área servida pelo sistema de movimentação
Proporção de área servida por corredores
Proporção de contenedores multi uso
Proporção de departamentos com adjacência correta
Proporção de departamentos com área adequada
Proporção de departamentos com forma geométrica adequada
Proporção de departamentos formados por tecnologia de grupo
Proporção de departamentos que podem aumentar capacidade produtiva
Proporção de máquinas de pequeno porte
Proporção de máquinas com operações otimizadas
Proporção de máquinas com <i>setup</i> otimizado
Proporção de máquinas duplicadas
Proporção de máquinas interligadas pelo sistema de movimentação
Proporção de máquinas multifuncionais
Proporção de operações que máquina típica pode executar
Proporção de operações que operador sabe executar
Proporção de operadores multifuncionais
Proporção de partes com rotas alternativas de processamento
Proporção de pedidos atendidos
Proporção de processos mapeados
Proporção de produtos com mercado consolidado
Proporção de tempo de utilização do sistema de movimentação
Proporção de tempo inoperante das máquinas
Proporção de tempo para lançamento de novos produtos
Proporção de tempo que o sistema de movimentação não é utilizado
Proporção do <i>mix</i> que é produzido na planta
Razão da distância ideal/real para produzir produto típico
Razão de tempo de processamento ideal/real
Razão de tempo de <i>setup</i> ideal/real
Razão de tempo para lançamento ideal/real de novos produtos
Razão do custo ideal/real de processamento
Razão do custo ideal/real de <i>setup</i>
Razão do número de cruzamentos de fluxos ideal/real

Figura 16: Listagem dos indicadores definidos

Fonte: elaborado pela autora (2009)

3.3 ETAPA II – PREPARAÇÃO DA EQUIPE DE TRABALHO

Nesta etapa, se prepara a equipe envolvida na sistemática de avaliação e melhoria. Sugere-se realizar um levantamento preliminar na própria empresa, buscando entender as questões de mercado nas quais está inserida, seu diferencial quanto a seus principais concorrentes e sua lógica de produtos para auxiliar na compreensão dos fatores terciários que afetam a flexibilidade do *layout*. Esse levantamento pode ser realizado anteriormente ao

desenvolvimento das próximas etapas ou concomitantemente as etapas de medição, por exemplo. Também podem ser realizados levantamentos dos processos dos principais produtos, entendendo lógicas de fluxo, de compartilhamento de recursos e de restrições físicas.

3.4 ETAPA III – ELABORAÇÃO DA ÁRVORE DE FLEXIBILIDADE DE LAYOUT

Nesta etapa, se elabora a árvore da flexibilidade de *layout*. A árvore é uma estrutura que organiza os fatores que impactam na flexibilidade de *layout* em três diferentes níveis; posteriormente, estes fatores são ponderados conforme as técnicas do QFD. A ponderação dos fatores, resultantes da árvore de flexibilidade de *layout*, é utilizada como valor de entrada na matriz de flexibilidade de *layout* a ser vista na etapa IV. Um exemplo de estrutura genérica de árvore de flexibilidade de *layout* é apresentado na Figura 17.

Fator primário (F1 _m)	Fator secundário (F2 _n)	%F2 _n	Fator terciário (F3 _i)	peso	%F3 _i	IFF _i	IFF _i *	
F1 _m	F2 ₁		F3 ₁	PESO F3 ₁				
			F3 ₂	PESO F3 ₂				
			F3 ₃	PESO F3 ₃				
	PESO F2 ₁	%F2 ₁			100	%F2 ₁		
	F2 ₂		F3 ₄	PESO F3 ₄				
			F3 ₅	PESO F3 ₅				
			F3 ₆	PESO F3 ₆				
	PESO F2 ₂	%F2 ₂			100	%F2 ₂		
TOTAL		100				100		

Figura 17: Estrutura genérica da árvore de flexibilidade de *layout*

Fonte: elaborado pela autora (2009)

O principal objetivo da elaboração da árvore da flexibilidade de *layout* é o posterior cálculo dos índices (de flexibilidade do fator e corrigido), para os fatores (representados nas linhas), cujo peso foi consensado pela opinião de especialistas da empresa em que o índice será medido. Os pesos atribuídos devem diferenciar fatores que colaboram para tornar o *layout* atual flexível, gerando a flexibilidade de *layout*. Salienta-se que, neste momento, o interesse de pesquisa é a avaliação do conjunto de fatores reais, não ideais e nem almejados. Os fatores primários têm seu peso atribuído de acordo com a literatura; já os fatores secundários e terciários têm seu peso atribuído pelos especialistas da empresa.

Aos três fatores primários, que estão posicionados na primeira coluna da Figura 15, são atribuídos pesos de 40; 25 e 35 respectivamente, por sugestão de Raman *et al.* (2009a), sugerindo importância aproximadamente igual ao fator de proximidade de departamentos e de associação com os outros tipos de flexibilidade de manufatura.

Os fatores secundários e terciários, posicionados respectivamente na segunda e terceira colunas da Figura 15, são comparados entre si pela equipe de especialistas da empresa para ter seu peso valorado.

Estes pesos advém da opinião individual, da opinião de grupos através da técnica de grupos focados, da opinião obtida através de técnica *Delphi* ou outra técnica julgada adequada. No caso de formação de equipe para apropriar os pesos dos fatores, a equipe deve ser multifuncional. Pelas informações que são solicitadas sugere-se a participação em uma reunião conjunta de um profissional responsável pelo *layout*, pela produção, pelo planejamento e controle da produção, pelo lançamento de novos produtos/projetos, pela venda/previsão de demanda e pela operação propriamente dita.

A discussão efetivada na reunião deve versar sobre o tipo de incertezas a que a instalação está submetida e quais são os *buffers* que já foram criados, com o objetivo de gerar flexibilidade ao *layout*. Os *buffers* estão mais fortemente associados aos fatores de proximidade de departamentos e utilização da área produtiva. Sugere-se iniciar a reunião priorizando as principais incertezas a que a instalação está submetida (mudança de *mix* de produto, descontinuidade ou alteração de níveis de demanda, quebra de máquinas, absenteísmo exagerado da força de trabalho, necessidade de alteração das características técnicas do sistema de movimentação, exigência de produtos com novas características físicas, técnicas, etc).

Questões motivadoras podem auxiliar no andamento da reunião, tais como: (i) atualmente, quais destes fatores colaboram para dar mais flexibilidade ao *layout*: fluxo de materiais ou fluxo de não materiais? (ii) se continuar ocorrendo necessidade de adicionar capacidade ao sistema (flexibilidade de expansão) e o *layout* tiver que continuar adequado, colaborariam mais com esta situação: as áreas desperdiçadas, as áreas reservada para expansão ou as configurações modulares? A lógica interna que deve ser considerada é de definir a quais incertezas a instalação está submetida, considerando um período de análise que represente as mudanças nos últimos tempos, e encontrar o que minimiza o problema, o que colabora para tornar o *layout* mais flexível, robusto, dinâmico ou reconfigurável.

Sugere-se que os fatores sejam comparados entre si, dentro da classe de fatores primários e secundários para facilitar a diferenciação/comparação. Aos fatores são atribuídos valores que variem de 0 a 10, sendo que o valor 0 significa que o fator não tem nenhuma importância para dar mais flexibilidade ao *layout* (o que pode ocorrer no caso de não haver, por exemplo, nenhuma necessidade de um sistema de movimentação) e o valor 10 significa que o fator tem importância máxima para dar flexibilidade ao *layout* (o que pode ocorrer no

caso de haver, por exemplo, um *layout* totalmente funcional, com alta variedade de produtos, baixo volume e fluxo de materiais intenso).

Posteriormente a esta designação de pesos, realiza-se o cálculo dos índices de flexibilidade do fator e do fator corrigido. Para o cálculo destes índices, é necessário seguir os passos abaixo.

- i) Calcular o percentual dos fatores secundários ($\%F2_n$) e terciários ($\%F3_i$);
- ii) Calcular o índice de flexibilidade do fator (IFF_i); e
- iii) Calcular o índice de flexibilidade do fator corrigido (IFF_i^*).

O percentual dos fatores secundários ($\%F2_n$) e terciários ($\%F3_i$) expressa a importância do fator neste nível se comparado com os demais itens da coluna. Para obtenção destes percentuais, utilizam-se respectivamente as equações (3) e (4), onde $P_{F2,n}$ é o peso do fator secundário, $P_{F3,i}$ é o peso do fator no nível terciário, $n = 1, \dots, 12$ e $i = 1, \dots, 33$.

$$\%F2_n = \frac{P_{F2,n}}{\sum_{n=1}^{12} P_{F2,n}} \quad (3)$$

$$\%F3_i = \frac{P_{F3,i}}{\sum_{i=1}^{33} P_{F3,i}} \quad (4)$$

O índice de flexibilidade do fator (IFF_i) indica a importância dos fatores relacionados no nível terciário. Aqui é expressa a importância que o cliente dá para cada fator, que guarda relação com as metas em termos de flexibilidade ou com a flexibilidade já disponível. Para cálculo do IFF_i se utiliza a equação (5).

$$IFF_i = \%F2_n \cdot \left(\frac{\%F3_i}{100} \right) \quad (5)$$

O índice de flexibilidade do fator corrigido (IFF_i^*) considera as diferenças existentes entre os pesos do nível terciário em relação ao peso do nível secundário. As diferenças entre os pesos ocorrem quando o peso máximo do nível terciário, dentro do subgrupo, é maior que o peso do nível secundário. Para o cálculo do IFF_i^* , utiliza-se a equação (6), onde $IFF_{\max/sub}$ é o valor máximo entre os IFF_i dos elementos do subgrupo.

$$IFF_i^* = P_{F2,n} \cdot \left(\frac{IFF_i}{IFF_{\max/sub}} \right) \quad (6)$$

Após o cálculo desses índices são realizadas análises para verificar que fatores terciários e secundários têm maior e menor impacto na flexibilidade de *layout* da instalação.

Ressalta-se que a informação pode ser utilizada tanto sob o enfoque dos fatores terciários, que são mais específicos, quanto sob o enfoque dos fatores secundários, que são mais amplos. Essas análises servem para guiar as ações de melhorias.

3.5 ETAPA IV- ELABORAÇÃO DA MATRIZ DE FLEXIBILIDADE DE LAYOUT

Nesta etapa, se elabora a matriz de flexibilidade de *layout*. Uma estrutura genérica da matriz de flexibilidade de *layout* é observada na Figura 18. Nesta matriz, os fatores terciários são apresentados nas linhas e os indicadores são apresentados nas colunas.

Fator terciário (F3)	I ₁	I ₂	I ₃	I ₄	I ₅	I ₆	I ₇	I ₈	I ₉	I ₁₀	I ₁₁	I ₁₂	I ₁₃	I _j	IFF _i *	IFF _i %
F3 ₁	IR_{ij}															
F3 ₂																
F3 ₃																
F3 ₄																
F3 ₅																
F3 ₆																
F3 ₇																
F3 ₈																
F3 ₉																
F3 ₁₀																
F3 ₁₁																
F3 _i																
IIF _j																

Figura 18: Estrutura genérica da matriz de flexibilidade de *layout*

Fonte: elaborado pela autora (2009)

O principal objetivo da elaboração da matriz da flexibilidade de *layout*, nesta etapa, é o cálculo do índice de importância do indicador de flexibilidade (IIF_j) para cada indicador; tais resultados serão utilizados para calcular o índice geral de flexibilidade na etapa VI.

Para o cálculo do IIF_j , é necessário seguir os passos abaixo:

- i) Estabelecer a intensidade de relacionamento (IR_{ij}) existente entre os fatores terciários e os indicadores;
- ii) Transformar o índice de flexibilidade do fator corrigido (IFF_i^*), calculado na etapa II, em valor percentual ($IFF_i\%$);
- iii) Calcular a importância do indicador de flexibilidade (IIF_j);

A intensidade de relacionamento entre os fatores terciários e os indicadores é estabelecida pela literatura e depende da opinião de especialistas teóricos, embasados em artigos de cunho quantitativo. Neste trabalho, a intensidade de relacionamento encontrada na

literatura estudada foi consolidada pela autora deste trabalho. Uma vez definida, não pode ser alterada pelos usuários da sistemática, pois pode ocorrer um desbalanceamento interno, uma vez que novos indicadores podem ser ponderados de forma diferente dos anteriormente designados. A intensidade de relacionamento é identificada no cruzamento de linhas e colunas, no corpo da matriz da Figura 18. A intensidade de relacionamento é designada utilizando uma escala de 0 a 5, onde 0 designa uma situação de intensidade inexistente e 5, uma situação de intensidade forte.

Como alternativa de validação da intensidade de relacionamento entre os fatores terciários e os indicadores, sugere-se efetivar uma análise de *clusters*, uma vez que a técnica agrega objetos com base nas características que os mesmos possuem. Os agrupamentos devem possuir elevada homogeneidade interna e externa, o que garante a validade do modelo de agrupamento.

A transformação do IFF_i^* em valor percentual é realizada para que se tenha uma noção proporcional da representação das diferenças existentes entre os subgrupos do nível terciário, padronizando a representação unitária do todo.

A importância do indicador de flexibilidade (IIF_j) é dada pela soma de produtos entre o índice de flexibilidade do fator corrigido, relativo a cada fator terciário, e as intensidades de relacionamento presentes na coluna do indicador. O cálculo do IIF_j é realizado conforme a equação (7), onde $j=1, \dots, J$.

$$IIF_j = \sum_{i=1}^n IFF_i \% \cdot IR_{ij} \quad (7)$$

Após o cálculo do IIF_j são realizadas análises para verificar que indicadores têm maior e menor impacto na flexibilidade de *layout* da instalação. Essas análises servem para guiar as ações de melhorias.

A matriz de flexibilidade de *layout* é apresentada no Apêndice B.

3.6 ETAPA V – MEDIÇÃO DOS INDICADORES DE FLEXIBILIDADE DE LAYOUT

Nesta etapa, se medem os diferentes indicadores de flexibilidade de *layout*.

Para medir cada indicador, é necessário seguir os passos abaixo:

- i) Determinar o alvo do indicador;
- ii) Determinar a forma de medir cada indicador;

- iii) Medir localmente o valor atual do indicador (que varia entre 0 e 1, sendo que o limite inferior representa uma situação de desvio máximo do alvo).

A determinação do alvo de cada indicador pressupõe uma situação de incerteza, crescente nos ambientes fabris atuais. Como consequência, a flexibilidade requerida também é maior, isto é, uma característica do tipo maior-é-melhor e o alvo dos indicadores é sempre 1. Os indicadores são de três tipos: grau, proporção e razão. Aos indicadores do tipo grau são atribuídas notas pela equipe da empresa; aos indicadores do tipo proporção é aplicado um cálculo proporcional em relação ao total, pois a função é linear e crescente; aos indicadores do tipo razão é aplicado um cálculo proporcional do ideal em relação ao real, pois a função é exponencial decrescente. São exemplos, o grau de facilidade de lançar novos produtos, o grau de frequência de rearranjo das máquinas, a proporção de máquinas duplicadas, a proporção de operadores multifuncionais, a razão da distância ideal/real para produzir produto típico, a razão de tempo de *setup* ideal/real, entre outros.

A medição de cada indicador é realizada localmente, sendo que alguns dados são quantitativos (como distância percorrida, tempo de *setup*, número de cruzamentos entre fluxos), enquanto outros envolvem avaliações subjetivas (como grau de inovação dos novos produtos, grau de variedade do *mix*, etc.). Todos os dados são medidos e posteriormente colocados numa escala proporcional de 0 a 1, decididos em comum acordo com os encarregados dos processos. Nessas análises devem ser consideradas verificações de custo benefício de cada indicador. Como sugestões propõe-se verificar quesitos de bom senso, de segurança, de circulação (espaço livre), de facilidade de execução, de custo propriamente dito, entre outros. Sugere-se formar uma equipe que divida a tarefa de medir os diferentes indicadores e que gere os índices finais.

3.7 ETAPA VI – CÁLCULO DO ÍNDICE GERAL DE FLEXIBILIDADE DE LAYOUT

Nesta etapa se calcula o índice geral de flexibilidade de *layout* (*IGFL*). Este índice reflete a flexibilidade existente na instalação, considerando que os pesos dos fatores secundários e terciários são especificados pelos próprios especialistas da instalação. Os pesos dos fatores primários são designados de acordo com a literatura da área.

O *IGFL* verificado periodicamente pode sinalizar melhoria da flexibilidade de *layout* ou o contrário. O *IGFL* também pode ser útil ao simular pesos diferenciados dos fatores, priorização de um fator em relação a outro.

Além disto, também se poderá gerar sub-índices derivados do geral, priorizando os diferentes produtos obtidos pelo numerador da equação (8).

O cálculo do *IGFL* é realizado conforme a equação (8), onde $I_{j/med}$ é a medição individual de cada indicador, efetuada na etapa IV.

$$IGFL = \frac{\sum_{j=1}^n IIF_j \times I_{j/med}}{\sum_{j=1}^n IIF_j} \quad (8)$$

3.8 ETAPA VII – CÁLCULO DO ÍNDICE MELHORADO DE FLEXIBILIDADE DE LAYOUT

Nesta etapa se calcula o índice melhorado de flexibilidade de *layout* (*IMFL*). Este índice reflete a flexibilidade que seria adquirida na instalação se fosse efetivada alguma melhoria em determinados indicadores em detrimento de outros, etc. Este valor é atribuído ou calculado pela mesma equipe que mediu os indicadores na etapa V, e já devem ter sido incluídas considerações de custo benefício.

O resultado prático é que, por exemplo, ao se cogitar duplicar máquinas estratégicas, otimizar a utilização da área de armazenamento ou adquirir outro equipamento para movimentação de materiais, o valor medido do indicador aumentará (se aproximará de 1), logo o *IMFL* será melhorado.

Além disto, também será possível gerar sub-índices derivados do geral, priorizando os diferentes produtos obtidos pelo numerador da equação (9), enfocando em melhorias específicas.

O cálculo do *IMFL* é realizado conforme a equação (9), onde $I_{j/ideal}$ é o valor ideal de cada indicador.

$$IMFL = \frac{\sum_{j=1}^n IIF_j \times I_{j/ideal}}{\sum_{j=1}^n IIF_j} \quad (9)$$

3.9 ETAPA VIII – CÁLCULO DAS CONDIÇÕES REAIS DE FLEXIBILIDADE DE LAYOUT

Nesta etapa se realiza o cálculo reverso do QFD de modo a refletir as condições reais de flexibilidade da instalação.

Quando ocorre o preenchimento dos pesos na árvore de flexibilidade de *layout* na etapa III, os especialistas avaliam a situação atual da instalação. Neste caso, inicialmente os valores de entrada (que formam um vetor) são multiplicados pela matriz de intensidades de relacionamento, o que resulta num outro vetor. Posteriormente se efetuam os cálculos apresentados nas equações (8) e (9), e se obtêm os valores dos índices geral e melhorado.

No texto que se segue, matrizes serão identificadas por letras maiúsculas em negrito, matrizes transpostas têm o acréscimo do *T* em sobrescrito, e vetores são identificados por letras minúsculas em negrito.

De forma aplicada, o que se propôs nas etapas I, III e IV, foi implementar a equação (10), onde \mathbf{R} é a matriz de intensidade de relacionamentos, $\mathbf{f}_i\%$ é o vetor de flexibilidade do fator corrigido em formato percentual e \mathbf{i}_j é o vetor de importância do indicador de flexibilidade no estado atual.

$$\mathbf{R}^T \times \mathbf{f}_i\% = \mathbf{i}_j \quad (10)$$

De forma genérica, o cálculo no QFD ocorre conforme a equação (11), onde: \mathbf{e} é o vetor que contém os dados de entrada da matriz, \mathbf{M}^T é a transposta da matriz de intensidade de relacionamentos e \mathbf{s} é o vetor de resultados finais, provindas da opinião de especialistas.

$$\mathbf{M}^T \times \mathbf{e} = \mathbf{s} \quad (11)$$

Para obter valores reais, que representem as potencialidades da instalação em termos de flexibilidade de *layout*, baseados no nível dos indicadores reais que foram medidos, realizam-se operações inversas as usuais na matriz do QFD. Se nada for alterado na árvore e na matriz de flexibilidade de *layout* e se todos os indicadores estiverem no valor máximo (1), a operação inversa gera o mesmo vetor de pesos terciários gerado na etapa II.

Na prática, os vetores de importância do indicador não se apresentam nos níveis máximos, pois estão multiplicados pelo valor real/ideal de cada indicador [representado no numerador das equações (8) e (9)]. No cálculo reverso do QFD, num primeiro momento se verifica o efeito do vetor \mathbf{i}_j sobre o vetor $\mathbf{f}_i\%$. Num segundo momento, pressupõe-se que o vetor \mathbf{i}_j seja alterado (para $\mathbf{i}2_j$) passando a refletir uma situação que os indicadores têm possibilidade de alcançar, e verificar a consequência desta alteração no vetor $\mathbf{f}2_i\%$. Num

terceiro momento se analisam as saídas, se verificam as diferenças entre os vetores $\mathbf{f}_i\%$ e $\mathbf{f}_{2i}\%$ e se postulam as conclusões.

Se os vetores $\mathbf{f}_i\%$ e $\mathbf{f}_{2i}\%$ retornarem valores negativos na operação reversa do QFD, os fatores terciários associados a tais valores negativos não estarão colaborando para prover flexibilidade ao *layout*; a situação oposta ocorre no caso de valores positivos.

Verificando-se as diferenças entre os $\mathbf{f}_i\%$ e $\mathbf{f}_{2i}\%$ chega-se a um indicativo de quais fatores terciários estão sendo priorizados na instalação e quais poderiam ser priorizados para obter um *layout* flexível, de acordo com as possibilidades específicas de cada cenário. Comparando-se estes resultados com os da listagem gerada ao final da etapa III, ou com os valores do índice $IFFi\%$, se verifica a diferença entre o que está sendo avaliado pelos especialistas e as potencialidades geradas pelo conjunto de indicadores medidos.

No cálculo reverso do QFD, para encontrar \mathbf{e} a partir de \mathbf{M} e de \mathbf{s} , é necessário determinar a pseudo-inversa de \mathbf{M} dada pela equação (12), onde $(\mathbf{M} \times \mathbf{M}^T)^{-1}$ é a inversa de $(\mathbf{M} \times \mathbf{M}^T)$ (FOGLIATTO *et al.*, 2003).

$$\mathbf{e} = (\mathbf{M} \times \mathbf{M}^T)^{-1} \times \mathbf{M} \times \mathbf{s} \quad (12)$$

Assim sendo, para obter o vetor de flexibilidade do fator corrigido de forma a representar as condições reais dos fatores terciários e refletir os níveis medidos dos indicadores, partindo das equações (10) e (12), pode-se escrever a equação (13), onde $\mathbf{f}_i\%$ é o vetor de flexibilidade do fator corrigido em formato percentual.

$$\mathbf{f}_i\% = (\mathbf{R} \times \mathbf{R}^T)^{-1} \times \mathbf{R} \times \mathbf{i}_j \quad (13)$$

Da mesma forma, para obter o novo vetor de flexibilidade do fator corrigido de forma a representar as condições reais dos fatores terciários e refletir os níveis adquiridos nos indicadores se fosse efetivada alguma melhoria em alguns, em detrimento de outros, partindo das equações (10) e (12), pode-se escrever a equação (14), onde $\mathbf{f}_{2i}\%$ é o novo vetor de flexibilidade do fator corrigido em formato percentual.

$$\mathbf{f}_{2i}\% = (\mathbf{R} \times \mathbf{R}^T)^{-1} \times \mathbf{R} \times \mathbf{i}_{2j} \quad (14)$$

3.10 ETAPA IX – INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS

Nesta etapa se apresentam os resultados, visando agilizar a leitura dos dados e a interpretação dos mesmos.

Através da priorização dos índices que compõem o índice geral se observa quais indicadores e fatores têm maior impacto na flexibilidade de *layout* da instalação e quais, por

possuírem pequeno impacto, podem ser negligenciados. Sugere-se elaborar gráficos elucidativos interpretando os resultados e comparando diferentes indicadores e fatores.

Através da priorização dos índices que compõem o índice melhorado se observa quais indicadores e fatores possuem maior relação de custo benefício para melhorar a flexibilidade futura, ideal ou possível do *layout*. Podem ser realizados gráficos comparativos de uma situação e outra para verificar onde concentrar os esforços de melhoria.

Através da utilização do cálculo reverso do QFD, se espera identificar indicadores e fatores que realmente estão colaborando com a flexibilidade do *layout*, e por isso estão em um nível aceitável, e quais estão deficitários, e por isso deveriam ser melhorados.

Também se podem simular cenários com diferentes pesos para os fatores na árvore de flexibilidade de *layout*, representando diferentes ações gerenciais, diferentes investimentos de recursos, diferentes reações do mercado, dos clientes e dos concorrentes e discutir os resultados que podem ocorrer na prática.

3.11 ETAPA X – PROPOSIÇÃO DE MELHORIAS

Nesta etapa, partindo de uma lista de estado atual dos indicadores e seu peso junto à matriz de flexibilidade de *layout*, busca-se consenso sobre quais indicadores serão melhorados e quais já estão num nível aceitável, gerando um cronograma de implantação. Sugere-se gerar uma lista de priorizações realizando um 5W1H para as principais melhorias que serão efetivadas.

Alguns indicadores podem apontar para a necessidade de ações no nível supra, ou seja, de mudança física para um novo local. Neste caso a sistemática informa uma série de requisitos que o novo local deve apresentar, auxilia no entendimento das questões necessárias para a melhoria dos fluxos, para melhoria da utilização de áreas e para melhorar associações com outros tipos de flexibilidade. Estes requisitos devem ser explicitados para serem avaliados nos futuros *layouts* candidatos.

A reaplicação da sistemática de tempos em tempos pode auxiliar a entender o processo de adequação do *layout* como uma questão estratégica, mais ampla do que apenas designar novos locais para máquinas, departamentos e utilidades. Pelo fato da aplicação da sistemática pressupor trabalho em grupo multidisciplinar, com esforço de grupo considerável, espera-se disseminar uma cultura: estabelecer uma forma de avaliação e de proposição de pequenas mudanças, rotineiramente planejadas, que impactem em se ter um *layout* adequado às necessidades e às incertezas a que a instalação está submetida.

3.12 COMENTÁRIOS FINAIS

Este capítulo apresentou as etapas da sistemática de avaliação e melhoria da flexibilidade de *layout* em ambientes dinâmicos. A sistemática é composta de 10 etapas que são desenvolvidas e aplicadas em um caso real, o que é descrito no próximo capítulo.

4 VALIDAÇÃO DA SISTEMÁTICA PARA AVALIAÇÃO E MELHORIA DE FLEXIBILIDADE DE LAYOUT EM AMBIENTES DINÂMICOS

As informações obtidas junto à empresa analisada auxiliam a ilustrar o desenvolvimento e as vantagens da sistemática proposta nesta tese. Na seqüência, se exemplifica a aplicação da sistemática proposta. A primeira etapa da sistemática não requer aplicação na empresa, pois os fatores nos três níveis e os indicadores são os mesmos para a maioria dos sistemas de produção de peças discretas. A proposição das melhorias não será descrita, por não ser de interesse geral. Parte-se, então, para a apresentação das etapas II a VIII. Todas as etapas da sistemática são desenvolvidas utilizando planilhas *excel*.

Além de observação direta na empresa, utilizou-se o trabalho de Turatto (2008) como fonte de informações, já que o autor abordou o mesmo processo produtivo.

4.1 ETAPA II – PREPARAÇÃO DA EQUIPE DE TRABALHO

A etapa de preparação da equipe de trabalho é subdividida na apresentação da empresa e do mercado, na exposição dos principais produtos e processos e na análise genérica de fluxos e de ocupação de áreas.

4.1.1 Apresentação da empresa e do mercado

A empresa está localizada no município de Canoas, no estado do Rio Grande do Sul/Brasil. Foi fundada em 1946, e atua no mercado de equipamentos e processos para a indústria de bebidas. Iniciou como empresa familiar e, em 1973, com o aumento de sua participação no mercado, atraiu investidores alemães. Em 1975, outro grupo alemão tornou-se acionista e firmou um acordo de transferência de tecnologia na área de cervejarias, ficando responsável pelo desenvolvimento de tecnologias de ponta para a indústria cervejeira mundial, permanecendo como acionista até hoje. Em 1984, a empresa passou a investir no mercado de transporte de líquidos, produzindo implementos para transporte rodoviário, tais como silos, bi-trens e semi-reboques. A partir de 1992 ampliou sua atuação no mercado com linhas de produto para o processamento de refrigerantes e xaroparias. Em 1999, uma multinacional assumiu o controle acionário da empresa e o mantém até o momento.

Pode ser considerada de médio-grande porte, contando com cerca de 320 funcionários, divididos entre as áreas administrativa e fabril (administração da produção, chão-de-fábrica, manutenção e expedição). Devido à sazonalidade da demanda, crescente entre os meses de abril a outubro, utiliza-se freqüentemente a contratação de colaboradores de chão-de-fábrica terceirizados.

Os principais produtos são equipamentos voltados para a indústria de bebidas, destacando-se produtos para cervejarias, refrigerantes, sistemas de extração de resíduos, engarrafamento e transporte de líquidos. Devido à experiência e detenção de tecnologia, a empresa realiza desde a concepção (projeto básico) até o comissionamento dos itens produzidos, passando pelo projeto, seleção de equipamentos e execução final no cliente. A empresa trabalha com projetos totalmente customizados e corpo técnico totalmente especializado, fabricando produtos que se adaptam à necessidade de cada cliente; isto gera peculiaridades também na organização do *layout* fabril. Adicionalmente, participa de projetos de novas fábricas, reformas e ampliação de plantas já existentes, se adequando a realidade de cada cliente. Exemplificando, em 2007 a empresa realizou duas obras de novas filiais de cervejarias, além de algumas reformas e modernizações no Brasil e América Latina.

Os principais clientes são empresas, tais como Ambev, Cervejaria Petrópolis, Comary, Danone, Kaiser, Schincariol e Vonpar. A empresa está ampliando seus contatos e produzindo também para clientes da América Latina e Caribe, tais como cervejaria Commonwealth Brewery Limited (Bahamas), cervejaria Quilmes e cervejaria Santa Fé (Argentina), e Inkacola (Peru), entre outros.

Os principais concorrentes na linha de cervejarias e máquinas são empresas como a Codistil e a KHS Brasil. No setor de implementos rodoviários, os principais concorrentes são a Random, Recrusul e Rodotécnica.

4.1.2 Principais produtos e processos

A divisão dos produtos, em linhas gerais, produz quatro famílias, gerados pela distinção de processos de montagem final: carretas, lavadoras, pasteurizadores e tanques. A família de carretas é composta basicamente por bi-trens, silos e semi-reboques. A família das lavadoras é composta por máquinas lavadoras de garrafa, lavadoras de caixas e por reformas neste tipo de produto. A família de pasteurizadores é composta por aquecedores de garrafas e máquinas pasteurizadoras. A família mais ampla é a dos tanques, englobando tanques para xaroparias, filtração, misturas e filtragens.

Cada família possui características distintas de fabricação de peças, porém, até a chegada nos departamentos de montagem de produtos, suas peças passam pelos mesmos departamentos, como se pode verificar no fluxograma do processo na Figura 19. A empresa apresenta *layout* funcional, com foco nos processos, pois possui diversos departamentos especializados, tais como preparação, serralheria, pintura, polimento. A montagem final de cada família de produto ocorre em áreas separadas e independentes das outras.

Em um ano de faturamento típico, carretas, lavadoras, pasteurizadores e tanques representam respectivamente 19%, 31%, 9% e 41% no faturamento global da empresa. Entretanto, pelo maior volume de produção, a maior complexidade no *layout* fabril é gerada pela família de carretas, motivo de ser a família exemplificada na seqüência.

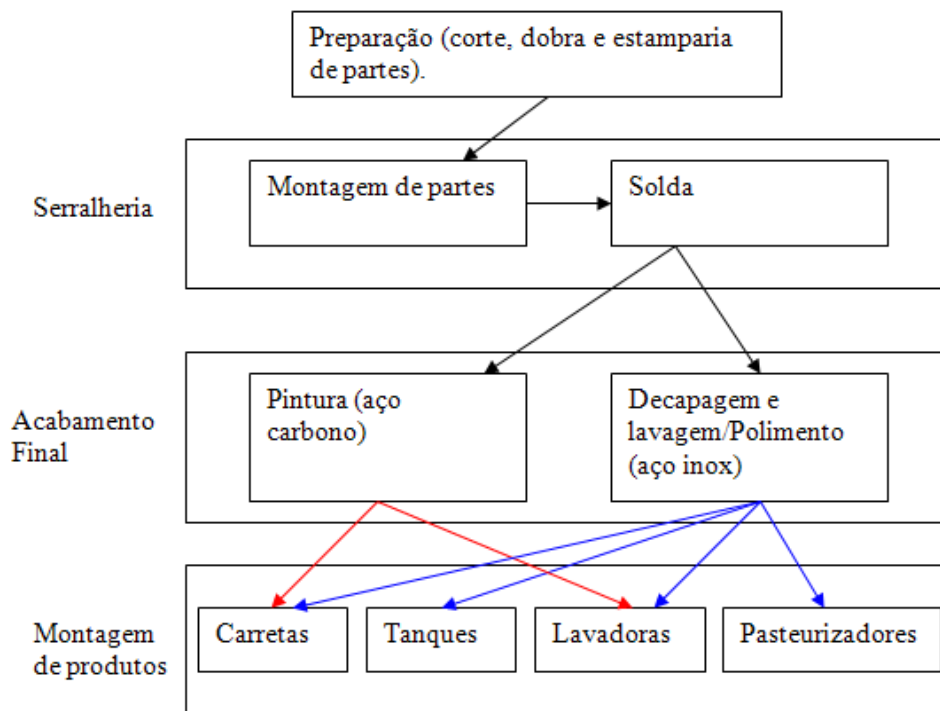


Figura 19: Fluxograma do processo produtivo

Fonte: adaptado de Turatto (2008)

Para exemplificar, a Figura 20 apresenta o processo produtivo de uma carreta típica. Conforme já mencionado, os outros produtos apresentam um processo produtivo semelhante, diferenciando-se apenas na composição das peças na montagem final.

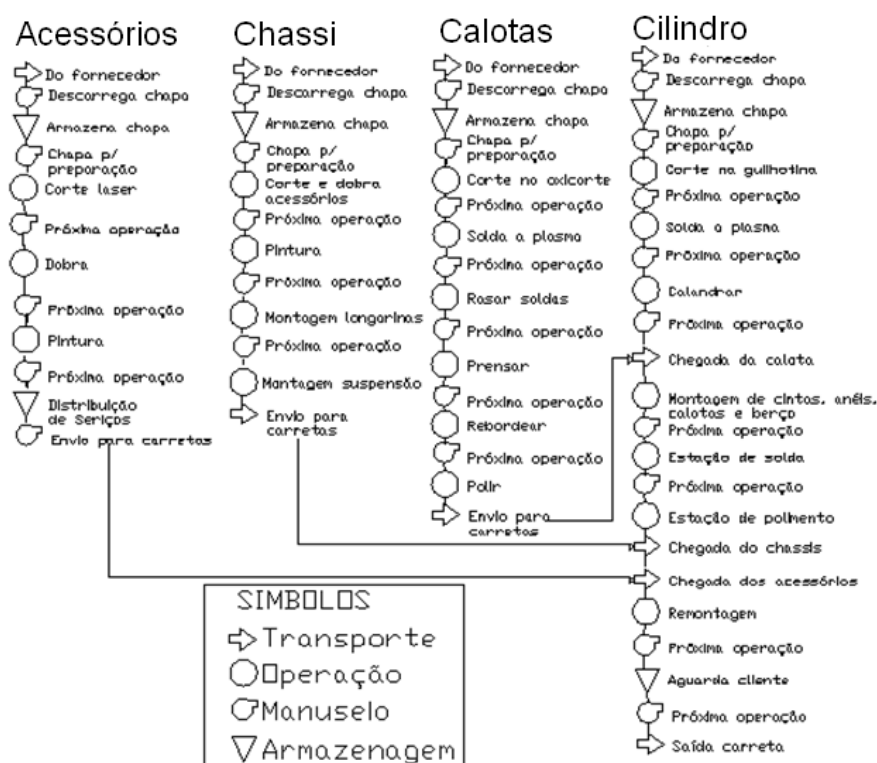


Figura 20: Fluxograma do processo produtivo de uma carreta típica

Fonte: adaptado de Turatto (2008)

Observa-se que o processo apresenta quatro fluxos básicos paralelos: fabricação de acessórios, calotas, cilindro e chassi. Os acessórios são cortados, dobrados, montados na serralheria e encaminhados para o acabamento final. As peças de aço inox são decapadas e polidas, e as peças de aço carbono são pintadas. Depois de concluídas, são armazenados em um departamento denominado distribuição de serviços, que é encarregado de consolidar a ordem de produção e agrupar todas as peças, até que sejam solicitadas para efetuar alguma montagem.

O corpo da carreta é composto por calotas, cilindro e alguns acessórios (cintas, anéis e berços). As calotas são cortadas, soldadas, prensadas, rebordadas e polidas. O cilindro é cortado, soldado e calandrado. Após, as calotas, alguns acessórios e o cilindro são soldados e polidos.

A montagem do chassi ocorre num setor específico, onde são fabricados paralelamente duas ou três unidades quando há alta demanda. Todos os itens do chassi são fabricados internamente, excetuando a suspensão que é comprada.

O corpo e o chassi são unidos, se realiza o teste hidrostático e a pintura. Na seqüência, demais acessórios são montados na carreta, sendo realizada a decapagem e o teste final. As carretas prontas ficam no pátio aguardando a retirada pelo cliente.

4.1.3 Análise genérica de fluxos e de ocupação de áreas

O fluxo de materiais possui diversos cruzamentos, e as distâncias percorridas para produzir um produto são significativas. Na Figura 21 é generalizado o cruzamento de fluxos para produzir uma carreta. Observa-se que chapas de aço inox e de aço carbono apresentam cruzamento com o fluxo de calotas, cilindros e acessórios, além do fluxo com carretas prontas e vice-versa.

Em termos de distâncias percorridas, as chapas de aço inox, que compõem os acessórios, percorrem aproximadamente 170 m do almoxarifado até a preparação (fluxo 1). As calotas e os cilindros percorrem aproximadamente 120 m da preparação até o local de solda (fluxo 2). Até a montagem final, calotas percorrem aproximadamente mais 130 m (fluxo 4 e 5), cilindros percorrem aproximadamente mais 110 m (fluxo 3), acessórios mais 220 m e o chassi outros 140 m. Todas as movimentações de materiais são realizadas com pontes (12), paleteiras (8) e empilhadeiras (4), que de forma geral não atendem a todas as necessidades.

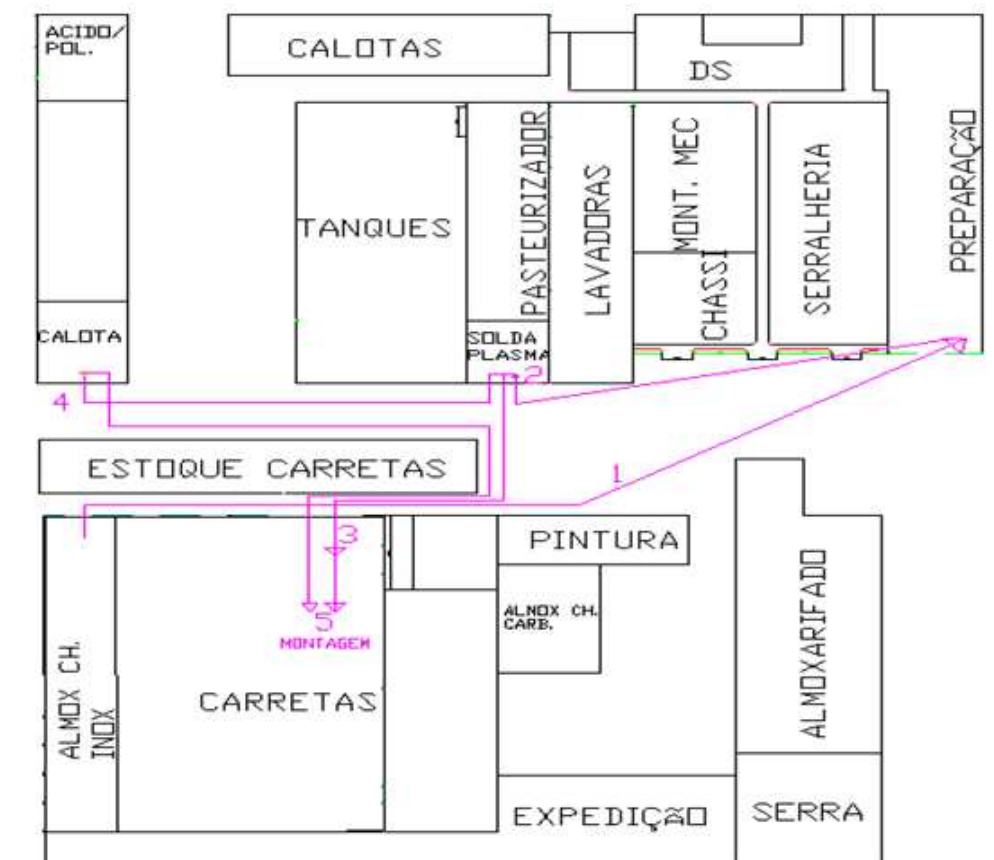


Figura 21: Fluxo de materiais

Fonte: adaptado de Turatto (2008)

A ocupação do espaço atual de acordo com as operações é demonstrada na Figura 22. As áreas produtivas, em que ocorre a produção propriamente dita, representam 47% da área total da empresa. Maiores detalhes são acrescentados ao longo da aplicação da sistemática.

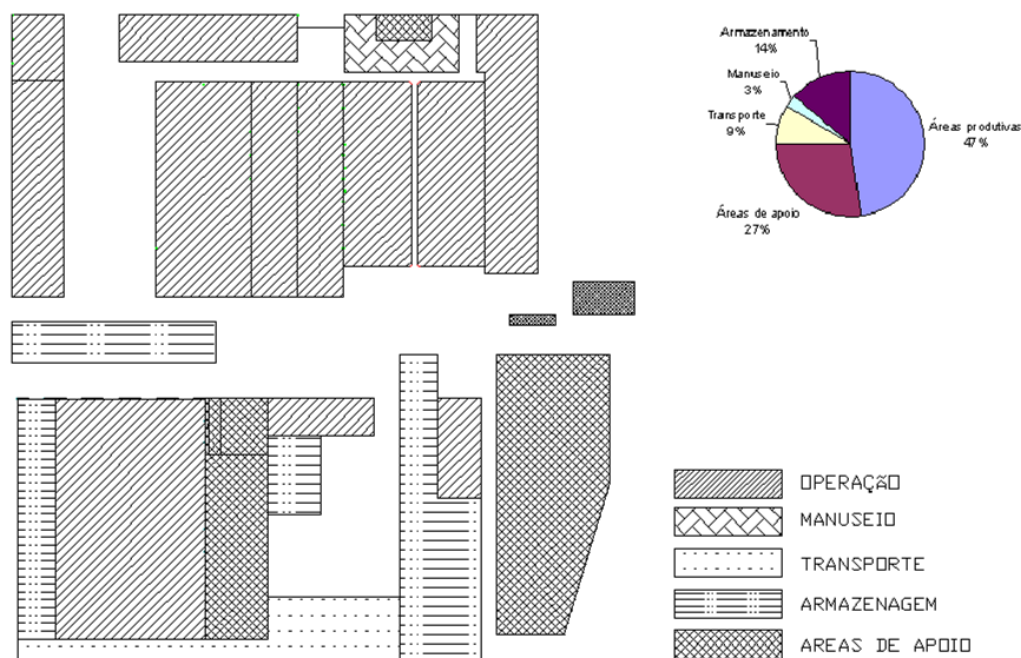


Figura 22: Análise da ocupação do espaço atual

Fonte: adaptado de Turatto (2008)

4.2 ETAPA III – ELABORAÇÃO DA ÁRVORE DE FLEXIBILIDADE DE LAYOUT

Nesta etapa da aplicação, elaborou-se a árvore de flexibilidade de *layout*. A árvore foi elaborada na empresa em uma reunião onde participaram um profissional responsável pela produção, um profissional responsável por projetos, um profissional representando a equipe de proposições de mudança de *layout* (que na empresa é o responsável pelo departamento de distribuição de serviços), e um representante do planejamento e controle da produção.

Inicialmente solicitou-se que os participantes expusessem o contexto externo na qual a empresa está inserida. Os participantes observaram que nos últimos três anos, os clientes estão bem mais exigentes, explicitam, e compartilham seus temores com a empresa e têm buscado diferenciar cada vez mais os seus produtos. No passado, a diferenciação buscada se referia à redução de custos; atualmente, se refere à melhoria no desempenho, na tecnologia, na eficiência energética, na estética, na redução dos prazos de entrega e dos tempos de instalação e montagem. A concorrência não tem aumentado, pois os clientes da empresa buscam um

produto customizado/diferenciado, e a competência técnica do corpo profissional não é questionada no mercado.

O contexto interno apresenta alguns desafios em termos de adequação a uma nova forma de gestão, mais horizontal. Antigamente a empresa era gerida por um profissional com profundo conhecimento técnico dos produtos; atualmente a empresa é gerida por uma equipe de profissionais com enfoque administrativo. De acordo com os participantes, as características técnicas dos produtos são inquestionáveis, mas muitas vezes sua aparência tem diminuído as oportunidades de venda. Decorrente disso, a empresa tem procurado melhorar a estética de seus produtos. Tem-se verificado investimentos pesados em áreas de apoio, como logística e insumos, áreas que antigamente nem existiam. O investimento nas ferramentas da qualidade é realizado mais para imitar os concorrentes do que para criar a cultura da melhoria. Como desafio desta nova forma de gestão, foi exposta a necessidade de equalizar expectativas entre os diferentes níveis hierárquicos da empresa.

Esses fatos colaboram para penalizar o projeto de instalações. O *layout* atual da empresa foi concebido nos anos 80, para produzir um produto que comercialmente quase não é utilizado (logo, não gera demandas), que são as máquinas lavadoras de garrafas. Recentemente, têm sido realizados estudos para tornar o *layout* atual mais adequado à nova estrutura de gestão e de fluxo de produtos, mas não foi efetivada nenhuma mudança física.

Após essas questões introdutórias e de contextualização ao ambiente que a empresa está inserida, partiu-se para o preenchimento da árvore de flexibilidade de *layout*. Os pesos foram atribuídos esgotando todas as comparações dentro do primeiro, depois do segundo e finalmente do terceiro fator primário. Todos os fatores foram explicados aos participantes e as dúvidas foram sanadas antes de atribuir-se os pesos. A Figura 23 apresenta a árvore de flexibilidade de *layout* elaborada. As células hachuradas foram preenchidas a partir da opinião dos usuários. Na terceira, sexta, sétima e oitava colunas são calculados, respectivamente, o peso de cada fator secundário, o peso de cada fator terciário, o índice de flexibilidade do fator e o índice de flexibilidade do fator corrigido. Os cálculos ocorrem conforme as equações (3), (4), (5) e (6), respectivamente.

O peso dos fatores secundários foi obtido através de consenso entre os participantes e por comparação dos diferentes fatores secundários, dentro de cada fator primário. O peso dos fatores terciários foi obtido por atribuição de nota em formulário individual, sem discussão entre os participantes. Optou-se por este formato para que todos expressassem sua opinião, sem constrangimento. Num segundo momento, calculou-se a média aritmética, sendo que em alguns casos, valores muito diferenciados foram retirados do cálculo da média.

Em termos de fatores secundários, a melhor nota foi atribuída à flexibilidade das máquinas (produção), pois as mesmas apresentam desempenho muito satisfatório e colaboram para dar flexibilidade ao *layout* atual. Mesmo que venha a ser necessário aumentar a sua quantidade, novas máquinas podem ser facilmente adquiridas junto aos fornecedores, pois são de uso comum e não necessitam adaptações. Para os participantes, os fatores que menos contribuem para a flexibilidade de *layout* foram a flexibilidade de expansão, de mercado e de novos produtos, e do sistema de movimentação. De forma geral, os participantes encontraram dificuldades para entender/diferenciar o impacto dos diferentes tipos de flexibilidade de manufatura na flexibilidade do *layout*. Os fatores primários de proximidade entre os departamentos e de utilização da área produtiva são mais facilmente associados a ter um *layout* adequado à situação.

Fator Primário (F1 _n)	Fator secundário (F2 _n)	% F2 _n	Fator terciário (F3)	peso	% F3 ₁	IFF ₁	IFF _n *	
PROXIMIDADE ENTRE OS DEPARTAMENTOS (soma = 40)	Fluxo de materiais	18,46	Adequação de fluxo de materiais intra	6,00	32,73	6,04	5,40	
			Adequação de fluxo de materiais inter	6,67	36,36	6,71	6,00	
			Adequação do sistema de movimentação	5,67	30,91	5,71	5,10	
	6	Fluxo de não materiais	21,54		18,33	100,00	18,46	
				6,67	48,78	10,51	6,67	
				7,00	51,22	11,03	7,00	
	7			13,67	100,00	21,54		
UTILIZAÇÃO DA ÁREA PRODUTIVA (soma = 25)	Área diretamente envolvida no processo	10,71	Utilização da área de máquinas	6,67	48,78	5,23	5,71	
			Utilização da área de armazenamento	7,00	51,22	5,49	6,00	
	6	Área que não está diretamente envolvida no processo	14,29		13,67	100,00	10,71	
				7,33	34,92	4,99	7,65	
				7,67	36,51	5,22	8,00	
				Existência de restrições de área (colunas, elevadores, paredes, escadas, circulação)	6,00	28,57	4,08	6,26
	8			21,00	100,00	14,29		
ASSOCIAÇÃO COM OUTROS TIPOS DE FLEXIBILIDADE DE MANUFATURA (soma = 35)	Expansão	3,30	Existência de áreas desperdiçadas (mal usadas)	3,83	100,00	3,30	5,00	
			Existência de área reservada para expansão	0,00	0,00	0,00	0,00	
			Existência de configurações modulares	0,00	0,00	0,00	0,00	
	5	Volume	5,28		3,83	100,00	3,30	
				7,67	34,85	1,84	7,67	
				8,00	36,36	1,92	8,00	
	8	Mix	5,28	Amplitude de variação de capacidade	6,33	28,79	1,52	6,33
				22,00	100,00	5,28		
				6,67	30,77	1,63	6,40	
	8	Mercado e (novos) produtos	3,30	Heterogeneidade do mix de produtos	6,67	30,77	1,63	6,40
				Desempenho do mix de produtos	8,33	38,46	2,03	8,00
	8			21,67	100,00	5,28		
	5	Roteamento e operações	3,30	Amplitude de lançamento de novos produtos	0,00	0,00	0,00	0,00
				Heterogeneidade de lançamento de novos produtos	0,00	0,00	0,00	0,00
				Demandas dos clientes (rapidez, confiabilidade e custos)	7,00	100,00	3,30	5,00
	5	Força de trabalho	3,30		7,00	100,00	3,30	
				Amplitude de rotas alternativas	0,00	0,00	0,00	0,00
				Heterogeneidade de rotas alternativas	0,00	0,00	0,00	0,00
	5	Máquinas (produção)	6,60	Quantidade de erros de qualidade causadas pelas operações	6,50	100,00	3,30	5,00
				6,50	100,00	3,30		
	Amplitude de tarefas que um operador pode efetuar			7,00	50,00	2,64	8,00	
8	Sistema de movimentação	2,64	Heterogeneidade das tarefas que um operador pode efetuar	7,00	50,00	2,64	8,00	
			14,00	100,00	5,28			
			Amplitude das máquinas	9,50	36,54	2,41	10,00	
10			Heterogeneidade das máquinas	8,50	32,69	2,16	8,95	
			Desempenho das máquinas	8,00	30,77	2,03	8,42	
			26,00	100,00	6,60			
4			Amplitude de caminhos do sistema de movimentação	6,50	35,14	0,93	4,00	
			Heterogeneidade do que é movimentado pelo sistema de movimentação	6,50	35,14	0,93	4,00	
			Desempenho do sistema de movimentação	5,50	29,73	0,79	3,38	
				18,50	100,0	2,64		

Figura 23: Árvore de flexibilidade de *layout* elaborada na empresa

Fonte: elaborado pela autora (2009)

Aplicando o peso de cada fator primário aos fatores secundários, observou-se que os maiores impactos ocorrem pelo fluxo de não materiais, fluxo de materiais, área não

diretamente envolvida no processo, e assim por diante, conforme pode ser observado na terceira coluna da Figura 23.

Aplicando a correção do fator terciário e calculando o índice de flexibilidade corrigido (IFF_i^*) conforme a equação (6), os fatores mais importantes para dar flexibilidade ao *layout* atual são amplitude das máquinas, heterogeneidade das máquinas, amplitude de tarefas que um operador pode efetuar, heterogeneidade das tarefas que um operador pode efetuar, e assim por diante, conforme pode ser observado na oitava coluna da Figura 23. Os presentes entenderam que como a empresa não apresenta áreas reservadas para expansão, não apresenta configurações modulares, não lança produtos novos, apenas realiza pequenas adaptações dos existentes e não realiza roteamentos, tais fatores terciários não colaboram para dar mais flexibilidade ao *layout* atual, recebendo peso zero.

4.3 ETAPA IV – ELABORAÇÃO DA MATRIZ DE FLEXIBILIDADE DE LAYOUT

Nesta etapa, partiu-se da matriz da intensidade de relacionamento (IR_{ij}) existente entre os fatores terciários e os indicadores, acrescidos dos valores de flexibilidade do fator corrigido (transformados em valor percentual), para calcular a importância do indicador e completar a matriz de flexibilidade de *layout*.

A Tabela 13 apresenta os fatores terciários em ordem decrescente de $IFF_i^*\%$. Estes fatores terciários são os mesmos da Figura 23, porém convertidos para uma escala de 0 a 1 para serem mais facilmente compreendidos ao longo da sistemática. Observa-se que todos os valores são positivos.

Tabela 13: Listagem de fatores terciários em ordem decrescente de $IFF_i^{*}\%$

Fator terciário (F₃)	$IFF_i^{*}\%$
Amplitude das máquinas	0,0567
Heterogeneidade das máquinas	0,0507
Desempenho das máquinas	0,0478
Utilização da área de transporte	0,0454
Adaptabilidade do sistema produtivo	0,0454
Desempenho do mix de produtos	0,0454
Amplitude de tarefas que um operador pode efetuar	0,0454
Heterogeneidade das tarefas que um operador pode efetuar	0,0454
Amplitude de variação de capacidade	0,0435
Utilização da área de espera e movimentação	0,0434
Adequação do fluxo de informações (papéis)	0,0397
Adequação do fluxo de pessoas	0,0378
Amplitude do mix de produtos	0,0363
Heterogeneidade do mix de produtos	0,0363
Acuracidade da previsão de demanda	0,0359
Existência de restrições de área (colunas, elevadores, paredes, escadas, circulação)	0,0355
Adequação de fluxo de materiais inter	0,0340
Utilização da área de armazenamento	0,0340
Utilização da área de máquinas	0,0324
Adequação de fluxo de materiais intra	0,0306
Adequação do sistema de movimentação	0,0289
Existência de áreas desperdiçadas (mal usadas)	0,0284
Demandas dos clientes (rapidez, confiabilidade e custos)	0,0284
Quantidade de erros de qualidade causadas pelas operações	0,0284
Amplitude de caminhos do sistema de movimentação	0,0227
Heterogeneidade do que é movimentado pelo sistema de movimentação	0,0227
Desempenho do sistema de movimentação	0,0192
Existência de área reservada para expansão	0,0000
Existência de configurações modulares	0,0000
Amplitude de lançamento de novos produtos	0,0000
Heterogeneidade de lançamento de novos produtos	0,0000
Amplitude de rotas alternativas	0,0000
Heterogeneidade de rotas alternativas	0,0000

Fonte: elaborado pela autora (2009)

A importância do indicador foi calculada utilizando a equação (7). A Tabela 14 apresenta os indicadores em ordem decrescente de contribuição para a flexibilidade de *layout* na empresa (IFF_j). Estes indicadores foram priorizados de acordo com os pesos atribuídos pela equipe de especialistas da empresa e pela intensidade de relacionamento consolidada na literatura pela autora deste trabalho.

Tabela 14: Listagem de indicadores em ordem decrescente de IIF_j

Indicadores	IIF_j	IIF_j %
Grau de adequação do sistema de produção ao volume de produção	1,76	0,042
Grau de frequência de rearranjo	1,71	0,041
Razão do número de cruzamentos de fluxos ideal/real	1,65	0,039
Razão da distância ideal/real para produzir produto típico	1,62	0,039
Proporção do <i>mix</i> que é produzido na planta	1,39	0,033
Proporção de área servida pelo sistema de movimentação	1,36	0,032
Proporção de pedidos atendidos	1,28	0,031
Proporção de máquinas interligadas pelo sistema de movimentação	1,27	0,030
Proporção de departamentos com adjacência correta	1,26	0,030
Razão de tempo para lançamento ideal/real de novos produtos	1,20	0,029
Proporção de área produtiva	1,18	0,028
Grau de variedade do <i>mix</i>	1,09	0,026
Grau de facilidade de adequar o <i>mix</i>	1,05	0,025
Proporção de contenedores multi uso	1,02	0,024
Proporção de tempo inoperante das máquinas	1,01	0,024
Proporção de partes com rotas alternativas de processamento	1,00	0,024
Razão do custo ideal/real de processamento	0,95	0,023
Proporção de departamentos formados por tecnologia de grupo	0,92	0,022
Proporção da produção para atender pedidos programados	0,89	0,021
Proporção de operações que máquina típica pode executar	0,87	0,021
Proporção de máquinas com operações otimizadas	0,84	0,020
Proporção de tempo que o sistema de movimentação não é utilizado	0,84	0,020
Proporção de máquinas multifuncionais	0,83	0,020
Proporção de área sem restrições	0,80	0,019
Proporção de máquinas com <i>setup</i> otimizado	0,80	0,019
Razão do custo ideal/real de <i>setup</i>	0,79	0,019
Razão de tempo de processamento ideal/real	0,79	0,019
Proporção de área servida por corredores	0,77	0,018
Proporção de área de armazenamento	0,76	0,018
Proporção de processos mapeados	0,72	0,017
Grau de qualidade dos produtos	0,69	0,016
Razão de tempo de <i>setup</i> ideal/real	0,66	0,016
Proporção de operadores multifuncionais	0,65	0,016
Proporção da produção <i>Just in time</i>	0,61	0,015
Proporção de departamentos com forma geométrica adequada	0,60	0,014
Proporção de máquinas duplicadas	0,58	0,014
Proporção de produtos com mercado consolidado	0,56	0,013
Proporção de departamentos com área adequada	0,55	0,013
Proporção de operações que operador sabe executar	0,50	0,012
Grau de similaridade entre os novos produtos e os antigos	0,50	0,012
Proporção de máquinas de pequeno porte	0,48	0,011
Grau de facilidade de aumentar capacidade produtiva	0,43	0,010
Grau de variação de volume do sistema de movimentação	0,43	0,010
Grau de variação de peso do sistema de movimentação	0,42	0,010
Proporção de área disponível para expansão futura	0,42	0,010
Proporção de departamentos que podem aumentar capacidade produtiva	0,40	0,009
Grau de facilidade de lançar novos produtos	0,34	0,008
Grau de facilidade de estabelecer rotas alternativas	0,33	0,008
Grau de inovação dos novos produtos	0,18	0,004
Proporção de quantidade de novos produtos lançados	0,17	0,004

Fonte: elaborado pela autora (2009)

4.4 ETAPA V – MEDIÇÃO DOS INDICADORES DE FLEXIBILIDADE DE LAYOUT

Nesta etapa, os indicadores foram medidos no chão-de-fábrica conforme descrito no Apêndice A. A medição de alguns indicadores foi realizada de forma superficial, permitindo apenas a ilustração do caso prático.

Ilustrando um exemplo de cada um dos tipos de indicadores definidos: (i) ao grau de variação do peso do sistema de movimentação foi atribuído o valor de 0,99, justificado pelo fato de que estão a disposição pontes de diferentes capacidades instaladas, empilhadeiras, paleteiras e até um guindaste quando é necessário movimentar grandes pesos; (ii) à proporção de departamentos com adjacência correta foi atribuído o valor de 0,67, calculado pela proporção que 103 combinações de adjacência correta representam na totalidade de 153 adjacências consideradas e; (iii) à razão do custo ideal/real de *setup* foi atribuído o valor de 0,90, calculado pela razão do custo ideal *setup* de um produto típico (que foi de R\$ 674,00) e do custo real de *setup* de um produto típico (que foi de R\$ 710,00).

As principais dificuldades de medição estiveram relacionadas à falta de informações comparativas dos concorrentes, falta de informações sobre o nível ideal dos indicadores e dificuldade de gerar valores médios, uma vez que os produtos são extremamente customizados.

4.5 ETAPA VI – CÁLCULO DO ÍNDICE GERAL DE FLEXIBILIDADE DE LAYOUT

Nesta etapa, o índice geral de flexibilidade de *layout* (*IGFL*) foi calculado de acordo com a equação (8) e pode ser observado na Tabela 15, resultando no valor de 0,573, indicando baixa flexibilidade de *layout*.

Os sub índices de priorização dos indicadores medidos, ou seja, os valores intermediários do somatório do numerador da equação (8) podem ser observados na quarta coluna. Conforme esta tabela, o indicador que mais contribui para a flexibilidade do *layout* é o grau de adequação do sistema de produção ao volume de produção, seguido da proporção do *mix* que é produzido na planta, seguido da proporção de área servida pelo sistema de movimentação e assim por diante.

Alguns indicadores possuem níveis excelentes, como por exemplo a proporção de área sem restrições, uma vez que a área da instalação não apresenta restrições como escadas, elevadores, vigas baixas; como por exemplo o grau de variação de peso e volume do sistema de movimentação anteriormente mencionado.

Tabela 15: Sub índices de priorização dos indicadores medidos

Indicadores (I_j)	IF_j (1)	I_{jmed} (2)	(1) x (2)
Grau de adequação do sistema de produção ao volume de produção	1,76	0,80	1,41
Proporção do mix que é produzido na planta	1,39	0,99	1,38
Proporção de área servida pelo sistema de movimentação	1,36	0,95	1,29
Proporção de máquinas interligadas pelo sistema de movimentação	1,27	0,95	1,21
Proporção de pedidos atendidos	1,28	0,80	1,03
Grau de variedade do mix	1,09	0,90	0,98
Proporção de contenedores multi uso	1,02	0,95	0,97
Razão do número de cruzamentos de fluxos ideal/real	1,65	0,53	0,88
Razão do custo ideal/real de processamento	0,95	0,90	0,86
Proporção de departamentos com adjacência correta	1,26	0,67	0,84
Proporção de área produtiva	1,18	0,70	0,82
Proporção de área sem restrições	0,80	1,00	0,80
Proporção da produção para atender pedidos programados	0,89	0,90	0,80
Razão de tempo de processamento ideal/real	0,79	0,97	0,76
Proporção de área de armazenamento	0,76	0,96	0,73
Razão do custo ideal/real de setup	0,79	0,90	0,71
Grau de qualidade dos produtos	0,69	0,92	0,63
Grau de facilidade de adequar o mix	1,05	0,60	0,63
Razão de tempo de setup ideal/real	0,66	0,95	0,63
Proporção de produtos com mercado consolidado	0,56	0,90	0,51
Proporção da produção Just in time	0,61	0,80	0,49
Proporção de departamentos com forma geométrica adequada	0,60	0,78	0,46
Proporção de departamentos com área adequada	0,55	0,83	0,46
Proporção de operações que máquina típica pode executar	0,87	0,50	0,43
Grau de variação de volume do sistema de movimentação	0,43	0,99	0,43
Grau de variação de peso do sistema de movimentação	0,42	0,99	0,42
Grau de similaridade entre os novos produtos e os antigos	0,50	0,80	0,40
Proporção de tempo inoperante das máquinas	1,01	0,39	0,39
Razão da distância ideal/real para produzir produto típico	1,62	0,23	0,38
Proporção de operações que operador sabe executar	0,50	0,61	0,31
Proporção de operadores multifuncionais	0,65	0,45	0,29
Proporção de departamentos que podem aumentar capacidade produtiva	0,40	0,56	0,22
Proporção de máquinas com setup otimizado	0,80	0,27	0,22
Proporção de tempo que o sistema de movimentação não é utilizado	0,84	0,25	0,21
Proporção de máquinas duplicadas	0,58	0,31	0,18
Proporção de máquinas multifuncionais	0,83	0,19	0,16
Proporção de partes com rotas alternativas de processamento	1,00	0,15	0,15
Proporção de máquinas de pequeno porte	0,48	0,31	0,15
Proporção de área servida por corredores	0,77	0,19	0,15
Proporção de processos mapeados	0,72	0,17	0,12
Grau de facilidade de estabelecer rotas alternativas	0,33	0,10	0,03
Proporção de máquinas com operações otimizadas	0,84	0,04	0,03
Proporção de área disponível para expansão futura	0,42	0,07	0,03
Grau de frequência de rearranjo	1,71	0,01	0,02
Grau de facilidade de aumentar capacidade produtiva	0,43	0,03	0,01
Grau de facilidade de lançar novos produtos	0,34	0,01	0,00
Grau de inovação dos novos produtos	0,18	0,01	0,00
Proporção de quantidade de novos produtos lançados	0,17	0,01	0,00
Proporção de departamentos formados por tecnologia de grupo	0,92	0,00	0,00
Razão de tempo para lançamento ideal/real de novos produtos	1,20	0,00	0,00
<i>IGFL</i>		0,573	

Fonte: elaborado pela autora (2009)

O baixo valor de *IGFL* reflete as deficiências da instalação em termos de flexibilidade de *layout*, pois muitos indicadores permanecem próximos ao limite inferior, como por exemplo: a proporção de área disponível para expansão futura, a proporção de máquinas com operações otimizadas; o grau de facilidade de aumentar capacidade produtiva; o grau de frequência de rearranjo, o grau de facilidade de lançar novos produtos; o grau de

inovação dos novos produtos; a proporção de quantidade de novos produtos lançados; a proporção de departamentos formados por tecnologia de grupo e a razão de tempo para lançamento ideal/real de novos produtos.

4.6 ETAPA VII – CÁLCULO DO ÍNDICE MELHORADO DE FLEXIBILIDADE DE LAYOUT

Nesta etapa, o índice ideal de flexibilidade de *layout* (*IMFL*) foi calculado de acordo com a equação (9) e pode ser observado na Tabela 16, resultando no valor de 0,628, indicando uma pequena melhoria na flexibilidade de *layout*.

Os sub índices de priorização dos indicadores melhorados em detrimento de outros, ou seja, os valores intermediários do somatório do numerador da equação (9) podem ser observados na quarta coluna.

A melhoria da flexibilidade de *layout* foi gerada aumentando a proporção de pedidos atendidos, alterando a localização de departamentos chaves, como os almoxarifados de chapas de aço inox e de chapas de aço carbono e o departamento de distribuição de serviços, alterando as matrizes distância e adjacência, aumentando a frequência de rearranjo, buscando a otimização dos tempos de *setup* e dos tempos de processamento, investindo em treinamento da força de trabalho para melhorar a qualidade dos produtos, entre outras ações viáveis. Os indicadores que foram melhorados são representados pelas linhas hachuradas na 0.

Comparando com a Tabela 15 se verifica a melhoria dos indicadores, o que somado a outras melhorias, representa o ganho de valor do *IMFL*. Observa-se que o atingimento do máximo de *IMFL* requer um esforço considerável da instalação, compatível com um prazo longo, principalmente no que se refere a criação da cultura de melhorias em termos de *layout*.

Tabela 16: Sub índices de priorização dos indicadores melhorados

Indicadores (I _j)	IIF_j (1)	$I_{j/ideal}$ (3)	(1) x (3)
Grau de adequação do sistema de produção ao volume de produção	1,76	0,80	1,41
Proporção do mix que é produzido na planta	1,39	0,99	1,38
Proporção de área servida pelo sistema de movimentação	1,36	0,95	1,29
Proporção de máquinas interligadas pelo sistema de movimentação	1,27	0,95	1,21
Proporção de pedidos atendidos	1,28	0,90	1,16
Grau de variedade do mix	1,09	0,90	0,98
Proporção de contenedores multi uso	1,02	0,95	0,97
Razão do número de cruzamentos de fluxos ideal/real	1,65	0,73	1,20
Razão do custo ideal/real de processamento	0,95	0,90	0,86
Proporção de departamentos com adjacência correta	1,26	0,73	0,91
Proporção de área produtiva	1,18	0,70	0,82
Proporção de área sem restrições	0,80	1,00	0,80
Proporção da produção para atender pedidos programados	0,89	0,90	0,80
Razão de tempo de processamento ideal/real	0,79	0,97	0,76
Proporção de área de armazenamento	0,76	0,96	0,73
Razão do custo ideal/real de setup	0,79	0,90	0,71
Grau de qualidade dos produtos	0,69	0,95	0,65
Grau de facilidade de adequar o mix	1,05	0,60	0,63
Razão de tempo de setup ideal/real	0,66	0,95	0,63
Proporção de produtos com mercado consolidado	0,56	0,90	0,51
Proporção da produção Just in time	0,61	0,90	0,55
Proporção de departamentos com forma geométrica adequada	0,60	0,95	0,57
Proporção de departamentos com área adequada	0,55	1,00	0,55
Proporção de operações que máquina típica pode executar	0,87	0,50	0,43
Grau de variação de volume do sistema de movimentação	0,43	0,99	0,43
Grau de variação de peso do sistema de movimentação	0,42	0,99	0,42
Grau de similaridade entre os novos produtos e os antigos	0,50	0,80	0,40
Proporção de tempo inoperante das máquinas	1,01	0,39	0,39
Razão da distância ideal/real para produzir produto típico	1,62	0,33	0,53
Proporção de operações que operador sabe executar	0,50	0,61	0,31
Proporção de operadores multifuncionais	0,65	0,70	0,46
Proporção de departamentos que podem aumentar capacidade produtiva	0,40	0,56	0,22
Proporção de máquinas com setup otimizado	0,80	0,54	0,43
Proporção de tempo que o sistema de movimentação não é utilizado	0,84	0,25	0,21
Proporção de máquinas duplicadas	0,58	0,31	0,18
Proporção de máquinas multifuncionais	0,83	0,19	0,16
Proporção de partes com rotas alternativas de processamento	1,00	0,20	0,20
Proporção de máquinas de pequeno porte	0,48	0,31	0,15
Proporção de área servida por corredores	0,77	0,19	0,15
Proporção de processos mapeados	0,72	0,40	0,29
Grau de facilidade de estabelecer rotas alternativas	0,33	0,10	0,03
Proporção de máquinas com operações otimizadas	0,84	0,54	0,45
Proporção de área disponível para expansão futura	0,42	0,17	0,07
Grau de frequência de rearranjo	1,71	0,20	0,34
Grau de facilidade de aumentar capacidade produtiva	0,43	0,03	0,01
Grau de facilidade de lançar novos produtos	0,34	0,01	0,00
Grau de inovação dos novos produtos	0,18	0,01	0,00
Proporção de quantidade de novos produtos lançados	0,17	0,01	0,00
Proporção de departamentos formados por tecnologia de grupo	0,92	0,00	0,00
Razão de tempo para lançamento ideal/real de novos produtos	1,20	0,00	0,00
IMFL		0,628	

Fonte: elaborado pela autora (2009)

4.7 ETAPA VIII – CÁLCULO DAS CONDIÇÕES REAIS DE FLEXIBILIDADE DE LAYOUT

Para determinar a flexibilidade de *layout*, refletida pela mensuração do *status* dos indicadores, utilizou-se o cálculo reverso do QFD, calculado pelas equações (13) e (14). O

ponto de partida é a matriz de flexibilidade de *layout* que sofre as operações definidas na equação (12), é multiplicada por \mathbf{i}_j (partindo da equação (8)) e gera $\mathbf{f}_i\%$. Num segundo momento, a matriz é multiplicada por $\mathbf{i}2_j$ (partindo da equação (9)) e gera $\mathbf{f}2_i\%$. Os vetores completos de \mathbf{i}_j e de $\mathbf{i}2_j$ são observados na quarta coluna das Tabelas 15 e 16.

Os resultados dessas operações podem ser observados na Tabela 17. A segunda coluna apresenta o peso do fator terciário ($\mathbf{f}_i\%$) quando se partiu do vetor gerado pela equação (8), também representado por (1). A terceira coluna apresenta o peso do fator terciário ($\mathbf{f}2_i\%$) quando se partiu do vetor gerado pela equação (9), também representado por (2). A quinta e a sexta colunas apresentam a priorização do maior para o menor fator terciário de impacto na flexibilidade de *layout*.

As células hachuradas em cinza são os fatores terciários que, de acordo com os indicadores medidos, são deficitários ao buscar-se a flexibilidade de *layout*. Observa-se que, ao simular melhorias, dois fatores terciários passam a integrar a lista de fatores que colaboram positivamente com a flexibilidade; são eles: existência de área reservada para expansão e adequação do fluxo de pessoas. Exemplificando: ao melhorar a razão da distância ideal/real para produzir um produto típico, a proporção de departamentos com adjacência correta, a proporção de departamentos com forma geométrica adequada, a proporção de departamentos com área adequada e a proporção de área disponível para expansão futura, se melhora o indicador de ‘existência de área reservada para expansão’. Esta análise pode ser estendida aos demais elementos da Tabela 17. Os valores negativos são um indicativo de que estes fatores deveriam ser priorizados para aumentar o *IGFL* e o *IMFL*.

Tabela 17: Comparação entre os fatores terciários utilizando o cálculo reverso do QFD

Fator terciário (F _{3i})	f _i % (1)	f _{2i} % (2)	(2) - (1)	Priorização		
				(1)	(2)	(1) - (2)
Amplitude de caminhos do sistema de movimentação	0,1947	0,1830	-0,0117	1	1	0
Heterogeneidade do mix de produtos	0,1472	0,1233	-0,0239	2	2	0
Adequação do sistema de movimentação	0,1024	0,0767	-0,0257	3	9	-6
Heterogeneidade de rotas alternativas	0,0990	0,0812	-0,0178	4	5	-1
Existência de áreas desperdiçadas (mal usadas)	0,0917	0,0858	-0,0059	5	3	2
Amplitude de tarefas que um operador pode efetuar	0,0878	0,0807	-0,0072	6	6	0
Acuracidade da previsão de demanda	0,0770	0,0851	0,0081	7	4	3
Quantidade de erros de qualidade causadas pelas operações	0,0709	0,0778	0,0069	8	8	0
Utilização da área de máquinas	0,0705	0,0794	0,0089	9	7	2
Adequação do fluxo de informações (papéis)	0,0622	0,0449	-0,0173	10	11	-1
Heterogeneidade das máquinas	0,0556	0,0354	-0,0203	11	13	-2
Amplitude de variação de capacidade	0,0433	0,0326	-0,0107	12	14	-2
Demandas dos clientes (rapidez, confiabilidade e custos)	0,0391	0,0219	-0,0173	13	15	-2
Amplitude do mix de produtos	0,0384	0,0484	0,0100	14	10	4
Desempenho do sistema de movimentação	0,0299	0,0428	0,0129	15	12	3
Heterogeneidade das tarefas que um operador pode efetuar	0,0248	0,0132	-0,0115	16	18	-2
Adequação de fluxo de materiais intra	0,0094	0,0218	0,0124	17	16	1
Adaptabilidade do sistema produtivo	0,0082	0,0195	0,0113	18	17	1
Utilização da área de transporte	0,0020	0,0094	0,0074	19	19	0
Existência de área reservada para expansão	-0,0027	0,0020	0,0047	20	21	-1
Utilização da área de espera e movimentação	-0,0104	-0,0317	-0,0214	21	27	-6
Amplitude de lançamento de novos produtos	-0,0119	-0,0212	-0,0093	22	24	-2
Utilização da área de armazenamento	-0,0195	-0,0214	-0,0019	23	25	-2
Existência de configurações modulares	-0,0319	-0,0314	0,0005	24	26	-2
Amplitude das máquinas	-0,0361	-0,0102	0,0259	25	22	3
Heterogeneidade de lançamento de novos produtos	-0,0376	-0,0172	0,0205	26	23	3
Adequação do fluxo de pessoas	-0,0510	0,0072	0,0582	27	20	7
Existência de restrições de área (colunas, elevadores, paredes, escadas, circulação)	-0,0571	-0,0610	-0,0040	28	30	-2
Adequação de fluxo de materiais inter	-0,0624	-0,0457	0,0167	29	29	0
Desempenho das máquinas	-0,0749	-0,0413	0,0336	30	28	2
Desempenho do mix de produtos	-0,0814	-0,0806	0,0008	31	31	0
Heterogeneidade do que é movimentado pelo sistema de movimentação	-0,0987	-0,0937	0,0050	32	32	0
Amplitude de rotas alternativas	-0,1581	-0,1673	-0,0092	33	33	0

Fonte: elaborado pela autora (2009)

Na quarta coluna se pode observar se da situação (1) para (2) ocorre aumento ou não da flexibilidade do fator terciário. São exemplos de aumento de flexibilidade a adequação de fluxo de materiais inter, desempenho das máquinas, utilização da área de transporte, entre outros. Tanto o aumento quanto a diminuição da flexibilidade de (1) para (2) são justificadas pelas diferenças de intensidades de relacionamento, que correlaciona um indicador a mais de um fator terciário.

Observando a sétima coluna se verificam três tipos de valores: negativos, nulos ou positivos. Os valores negativos significam que de (1) para (2) ocorreu perda de posição na ordem de priorização no índice. As maiores perdas de posição acontecem pela adequação do

sistema de movimentação e pela utilização das áreas de espera e movimentação. Essas perdas são explicadas pois, ao passar de (1) para (2), o sistema de movimentação continua a ter sua parcela de importância para a flexibilidade do *layout*, mas devido à melhora dos outros fatores terciários e a consequente redistribuição dos valores de $f_{2i}\%$ ele se reposiciona para um valor de menor importância. Já para a utilização das áreas de espera e movimentação se observa que elas já eram deficitárias em (1) e, devido à melhora dos outros fatores terciários e a consequente redistribuição dos valores de $f_{2i}\%$ ela se reposiciona para um valor mais negativo ainda. Os valores nulos significam que o fator terciário em (2) continua a ocupar a mesma posição que em (1), o que pode ser exemplificado pela utilização da área de transporte e pela amplitude dos caminhos do sistema de movimentação, entre outros exemplos. Os valores positivos significam que, em relação à situação (1), o fator terciário melhorou a sua posição na ordem de priorização. Os maiores ganhos de posição acontecem pela adequação do fluxo de pessoas, pelo desempenho e amplitude das máquinas. Realmente ao passar de (1) para (2) o rearranjo mais frequente do *layout*, a otimização dos tempos de *setup* e de operação, a maior parcela da produção ocorrendo *just in time* auxilia a melhorar o posicionamento destes fatores terciários. Esta análise pode ser estendida aos demais elementos da Tabela 17, ou seja, na prática a queda ou o aumento no posicionamento dos fatores terciários é justificada pela melhoria nos níveis medidos dos indicadores e seu impacto ponderado (dado pelas suas intensidades de relacionamento diferenciado e compartilhado) nos fatores terciários.

Finalizando, comparando a Tabela 13 com a 17 se verifica que os especialistas da instalação atribuem um peso de importância diferenciado e geram um ordenamento diferente dos fatores terciários se comparado ao ordenamento resultante do cálculo reverso do QFD. Por exemplo, a amplitude das máquinas, de acordo com a árvore de flexibilidade de *layout*, é um dos fatores terciários que mais contribui (1ª colocada) para dar flexibilidade ao *layout*. Entretanto, ao medir os indicadores se observa que a proporção de máquinas com *setup* e operações otimizadas, multi tarefas ou duplicadas é muito baixa; as máquinas estão mal distribuídas e por isso percorrem-se grandes distâncias, os operadores não são multi funcionais, o que leva a amplitude das máquinas a contribuir negativamente para a flexibilidade de *layout* e ocupar o posicionamento de 25ª colocada no ranking. Outro exemplo pode ser dado pelo desempenho do sistema de movimentação, que pelos resultados da árvore de flexibilidade de *layout* ocupa a última colocação (27^o colocado - antes apenas dos valores zerados). Ao medir os indicadores se observa que o desempenho do sistema de movimentação melhora (passa a ser o 15^o colocado), fato que é explicado pela grande variação de volume e

peso suportada, pela variedade de caminhos, pelos altos tempos inoperantes das máquinas, pela alta quantidade de máquinas interligadas pelo sistema de movimentação, pela grande quantidade de contenedores multi uso, e assim por diante, o que melhora a flexibilidade deste indicador. Provavelmente, estas diferenças também sejam influenciadas pela inserção dos especialistas num contexto externo e interno específico, bem como pelas suas expectativas pessoais e de grupo.

4.8 ETAPA IX – INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS

A aplicação da sistemática de avaliação e melhoria da flexibilidade de *layout* resulta em informações importantes na análise da flexibilidade do *layout* da empresa:

- i) A árvore de flexibilidade de *layout* elaborada, baseada na opinião dos especialistas da empresa, permite observar a ordem de importância dos fatores terciários que colaboram para dar flexibilidade ao *layout*, sob a ótica dos envolvidos no processo. Os resultados desta ponderação vêm apresentados na Figura 23 e na Tabela 13. Observa-se que para os especialistas todos os $IFF_i\%$ são positivos; não ocorre diferenciação entre amplitude e heterogeneidade; existe supervalorização de máquinas e número de operadores; e se tolera o desperdício de recursos (excesso).
- ii) A matriz de flexibilidade de *layout* elaborada permite observar o peso de importância de cada indicador que colabora para dar flexibilidade ao *layout*, sob a ótica dos diferentes graus de força de relacionamento internos, ao mesmo tempo em que leva em conta a opinião dos especialistas da empresa. Os resultados desta ponderação vêm apresentados na Tabela 14.
- iii) Os índices geral e ideal de flexibilidade de *layout* permitem posicionar a empresa relativamente a outras empresas frente à flexibilidade de *layout*, permitem simular melhorias nos indicadores, permitem simular alteração de pesos nos fatores secundários e terciários e verificar o impacto nos índices geral e ideal. Os resultados desta etapa vêm apresentados nas Tabelas 15 e 16. Cabe aos envolvidos no processo decidir quais melhorias devem ser implementadas e em quais casos se conviverá com as ineficiências.
- iv) O cálculo reverso do QFD permite verificar os fatores terciários que estão sendo valorados pela empresa, partindo da intensidade de relacionamento, que correlaciona um indicador a mais de um fator terciário. Esta matriz é

correlacionada aos valores medidos de cada indicador e retorna um novo vetor de pesos terciários, que pode ser comparado em duas ou mais situações, e que representa as potencialidades reais da instalação. Observa-se que, pelo cálculo reverso do QFD, alguns $IFF_i^{*}\%$ são positivos e outros negativos; ocorre diferenciação entre amplitude e heterogeneidade; o mesmo é fortemente afetado pelas diferentes intensidades de relacionamento que existem entre os indicadores e fatores terciários e; as relações de melhoria dos indicadores não são tão diretas pela lógica de intensidades de relacionamento designada na matriz de flexibilidade de *layout*.

- v) A reaplicação periódica da sistemática de avaliação e melhoria da flexibilidade de *layout* permite aos envolvidos entender o processo de adequação do *layout* como uma questão estratégica, mais ampla do que apenas designar novos locais para máquinas, departamentos e utilidades. Observa-se que, a flexibilidade de *layout* medida pela sistemática não privilegia apenas o fluxo de materiais inter e intra (que é diretamente afetado pela razão da distância, pela proporção de departamentos com adjacência correta, pela proporção de departamentos com forma e área adequada, por exemplo), mas também os tipos de flexibilidade de manufatura. Ao fazer isto, avalia número e heterogeneidade de máquinas, operadores, sistemas que auxiliam a movimentação de materiais, questões relacionadas ao mercado e lançamento de novos produtos, questões de *mix*, entre outras.

4.9 COMENTÁRIOS FINAIS

A aplicação da sistemática na empresa exemplificou a seqüência de etapas propostas, explicitou os dados necessários para efetuar a medição dos indicadores, apresentou as saídas propostas e indicou os principais direcionamentos para aumentar a flexibilidade do *layout*. Além disso, a sistemática é de implementação pouco complexa, baixo custo e alto retorno aos gestores da produção.

Em termos pessoais, a aplicação da sistemática apresentou diversos benefícios: oportunidade de vivência fabril e de contextualização dos conceitos teóricos, aumento do entendimento e utilidade prática da sistemática, e oportunidade de corrigir distorções da proposta original.

Os entraves operacionais foram devidos principalmente à dificuldade em diferenciar e medir alguns indicadores muito semelhantes como, por exemplo: avaliar o número de operadores multifuncionais e a variedade operações que os mesmos sabem executar, ou, diferenciar grau de variação de peso e de volume que o sistema de movimentação suporta. Supõe-se que a reaplicação periódica da sistemática facilite o entendimento dos envolvidos, bem como oriente para distorções não percebidas.

Por fim, houve dificuldade de reunir os especialistas da instalação e de obter consenso devido à grande heterogeneidade da vivência/responsabilidade dos participantes.

Em termos práticos, as empresas não possuem um *layout* nem ao menos adequado; quem diria flexível, robusto às incertezas das necessidades futuras da produção. Neste sentido, em muitos momentos houve confusão em diferenciar as duas situações. Constatou-se que alguns participantes não possuíam critérios para diferenciar um bom *layout* de um bom *layout* flexível. Adicionalmente, as mesmas deficiências de entendimento e simplificações de agrupamentos, verificadas e exemplificadas na literatura para a flexibilidade de manufatura (LIM, 1987; KARUPAN E GANSTER, 2004) também são estendidas à medição da flexibilidade de *layout*.

5 CONCLUSÕES

Atributos desejáveis de *layouts* que absorvem mudanças com facilidade, características de configurações físicas flexíveis, reconfiguráveis, robustas ou dinâmicas, têm sido objeto freqüente de pesquisa na área de produção. Este fato se deve à grande incerteza a que estão submetidas às instalações, tanto em termos de requisitos externos (gerados pelo mercado, pelos clientes e fornecedores) quanto em termos de requisitos internos (gerados por configurações das áreas, localização dos departamentos, máquinas, força de trabalho, sistema de movimentação). Neste contexto, a flexibilidade de *layout* representa um ganho para as empresas, principalmente no que se refere a sua mensuração, aqui representada por uma sistemática de avaliação e proposição de melhorias.

A análise dos principais autores da literatura apontou para a existência de três lacunas no processo de mensuração da flexibilidade de *layouts*: (a) ausência de um tipo de flexibilidade de manufatura que represente a flexibilidade de *layout*; (b) pequeno número de autores que pesquisam sobre quesitos de avaliação de *layouts* e; (c) dificuldade de reunir quesitos de proximidade, adjacência e de associação com outros tipos de flexibilidade de manufatura para representar a flexibilidade de *layout*.

A análise do desenvolvimento da sistemática (Capítulo 3) permite concluir que o objetivo geral e os objetivos específicos foram plenamente atingidos. A sistemática proposta: (i) desdobra os fatores primários, secundários e terciários que têm importância no aumento da flexibilidade do *layout*; (ii) estabelece pesos de importância para cada fator; (iii) estabelece indicadores para medir a flexibilidade do *layout*; (iv) estabelece a intensidade de relacionamento de cada indicador ao conjunto de fatores terciários; (v) prioriza os indicadores; (vi) mede localmente os níveis de cada indicador; (vii) calcula um índice geral de flexibilidade; (viii) calcula um índice ideal de flexibilidade de *layout*; (ix) avalia as potencialidades reais de flexibilidade de *layout*; e (x) verifica as principais oportunidades de melhoria do *layout* da instalação.

Os resultados obtidos através da comparação com a literatura evidenciaram a possibilidade de aplicação da sistemática em cenários específicos, a utilidade de agrupar os diferentes fatores sob a mesma ferramenta de avaliação e a facilidade de gerar as análises comparativas, por exemplo, utilizando planilhas eletrônicas.

Do ponto de vista gerencial, a sistemática de avaliação e melhoria da flexibilidade de *layout* proposta auxiliou na identificação dos fatores primários, secundários, terciários e indicadores cuja melhoria representa os maiores ganhos em termos de quesitos valorados pela

instalação (representado pela opinião de seus especialistas), e impacto real dos indicadores na instalação. A análise utilizando os resultados da matriz de flexibilidade de *layout* permite que as ações de melhorias iniciem pelos indicadores com maior peso nos índices gerais e melhorados de flexibilidade de *layout*. Por sua vez, a análise utilizando o cálculo reverso do QFD permite que os direcionamentos de melhoria sejam iniciados pelos fatores terciários mais deficitários em termos de flexibilidade de *layout*.

O desenvolvimento da sistemática e sua aplicação prática em uma instalação resultaram numa forma adicional e simplista de mensurar a flexibilidade de um *layout*, conforme demonstrado nesta tese. Sugere-se que os envolvidos reapliquem a mesma de tempos em tempos a fim de convergir para a obtenção de dados mais realistas de suas potencialidades e deficiências.

Entre os ganhos potenciais decorrentes do uso da sistemática proposta destacam-se: (a) estabelecimento de 5W1H para melhorias nos indicadores; (b) redução de custos operacionais pela melhoria da utilização da área, melhoria da adjacência e redução das incertezas das necessidades futuras da produção; (c) redução de custos pela possibilidade de simulação da alteração nos pesos de fatores e seu impacto na flexibilidade de *layout* em diferentes períodos; (d) redução nos custos de movimentação das máquinas e no custo de produção perdida.

Com relação ao desenvolvimento de pesquisas futuras orientadas para a melhoria da sistemática proposta, são possíveis os seguintes cursos de ação:

- a) Hierarquizar os tipos de flexibilidade de manufatura que compõem o fator primário de ‘associação com outros tipos de flexibilidade de manufatura’, de acordo com as lógicas dos autores da área (seção 2.1.2);
- b) Desenvolver uma ferramenta matemática para avaliar a independência dos indicadores e dos fatores primários, de forma a evitar que dois ou mais indicadores meçam o mesmo aspecto da instalação, o que potencialmente distorceria o cálculo dos índices IGFL e IMFL;
- c) Aumentar a utilização de indicadores quantitativos, menos dependentes da avaliação de especialistas e mais embasados em trabalhos como o de Lin e Sharp (1999a, 1999b);
- d) Comparar a flexibilidade de *layout* de empresas de tamanhos diferentes (por exemplo, em uma mesma cadeia produtiva ou no mesmo setor produtivo) e comparar os resultados;

- e) Permitir que os usuários determinem seus próprios fatores primários, secundários, terciários e indicadores.

REFERÊNCIAS

- AFENTAKIS, P.; MILLEN, R.A.; SOLOMON, M.M., Dynamic layout strategies for flexible manufacturing systems. **International Journal of Production Research**, v. 28, n. 2, p. 311-323, 1990.
- AKAO, Y., **Quality function deployment**: Integrating customer requirements into product design. Cambridge: Productivity Press, 1996.
- ANAND, G.; WARD, P.T., Fit, flexibility and performance in manufacturing: coping with dynamic environments. **Production and Operations Management**, v. 13, n. 4, p. 369-385, 2004.
- APPLE, J.M., **Plant layout and material handling**. New York: John Wiley, 1977.
- ASKIN, R.G.; CIARALLO, F.W.; LUNDGREN, N.H., An empirical evaluation of holonic and fractal layouts. **International Journal of Production Research**, v. 37, n. 5, p. 961-978, 1999.
- ASSAD, A.A.; KRAMER, S.B.; KAKU, B.K., Comparing functional and cellular layouts: a simulation study based on standardization. **International Journal of Production Research**, v. 41, n. 8, p. 1639-1663, 2003.
- AZADIVAR, F.; WANG, J., Facility layout optimization using simulation and genetic algorithms. **International Journal of Production Research**, v. 38, n. 17, p. 4369-4383, 2000.
- BAKER, P.; CANESSA, M., Warehouse design: A structured approach. **European Journal of Operational Research**, v. 193, n. 2, p. 425-436, 2009.
- BALAKRISHNAN, J.; CHENG, C.H., Dynamic Layout algorithms: a state-of-the-art survey. **Omega International Journal of Management Science**, v. 26, n. 4, p. 507-521, 1998.
- BALAKRISHNAN, J.; CHENG, C.H., Genetic search and the dynamic layout problem. **Computers & Operations Research**, v. 27, n. 6, p. 587-593, 2000.
- BALAKRISHNAN, J.; CHENG, C.H., Multi-period planning and uncertainty issues in cellular manufacturing: a review and future directions. **European Journal of Operational Research**, v. 177, n. 1, p. 281-309, 2007.
- BALAKRISHNAN, J.; CHENG, C.H., The dynamic plant layout problem: incorporating rolling horizons and forecast uncertainty. **Omega: The International Journal of Management Science**, v. 37, n. 1, p. 165-177, 2009.
- BALAKRISHNAN, J.; CHENG, C.H.; CONWAY, D.G., An improved pair-exchange heuristic for the dynamic layout problem. **International Journal of Production Research**, v. 38, n. 13, p. 3067-3077, 2000.
- BALAKRISHNAN, J.; JACOBS, F.R.; VENKATARAMANAN, M.A., Solutions for the constrained dynamic facility layout problem. **European Journal of Operational Research**, v. 57, n. 2, p. 280-286, 1992.
- BARAD, M., Impact of some flexible factors in FMSs - a performance evaluation approach. **International Journal of Production Research**, v. 30, n. 11, p. 2587-2602, 1992.

- BARAD, M.; NOF, S. Y., CIM flexibility measures: A review and a framework for analysis and applicability assessment. **International Journal Computer Integrated Manufacturing**, v. 10, n. 1-4, p. 296-308, 1997.
- BATEMAN, N.; STOCKTON, D.J.; LAWRENCE, P., Measuring the mix response flexibility of manufacturing systems. **International Journal of Production Research**, v. 37, n. 4, p. 871-880, 1999.
- BEACH, R.; MUHLEMANN, A. P.; PRICE, D. H. R.; PATERSON, A. ; SHARP, J. A., A review of manufacturing flexibility. **European Journal of Operational Research**, v. 122, n. 1, p. 41-57, 2000.
- BENJAAFAR, S., Models for performance evaluation of flexibility in manufacturing systems. **International Journal of Production Research**, v. 32, n. 6, p. 1383-1402, 1994.
- BENJAAFAR, S., Modeling and analysis of congestion in the design of facility layouts. **Management Science**, 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**, v. 32, n. 6, p. 58-76, 2002.
- BENJAAFAR, S.; RAMAKRISHNAN, R., Modelling measurement and evaluation of sequencing flexibility in manufacturing systems. **International Journal of Production Research**, v. 34, n. 5, p. 1195-1220, 1996.
- BENJAAFAR, S.; SHEIKHZADEH, M., Design of flexible plant layouts. **IIE Transactions**, v. 32, n. 4, p. 309-322, 2000.
- BLACK, J.T., **O Projeto da fábrica com futuro**. Tradução de Gustavo Kannenberg. Porto Alegre: Artes Médicas, 1998.
- BOYER, K.K.; LEONG, G.K., Manufacturing flexibility at the plant level. **Omega International Journal of Management Science**, v. 24, n. 5, p. 495-510, 1996.
- BOYER, K.K.; LEONG, G.K.; WARD, P.T.; KRAJEWSKI, L.J., Unlocking the potential of advanced manufacturing technologies. **Journal of Operations Management**, v. 15, n. 4, p. 331-347, 1997.
- BOYLE, T.A., Towards best management practices for implementing manufacturing flexibility. **Journal of Manufacturing Technology Management**, v. 17, n. 1/2, p. 6-21, 2006.
- BOZER, Y.A.; MELLER, R.D.; ERLEBACHER, S.J., An improvement type layout algorithm for single and multiple floor facilities. **Management Science**, v. 40, n. 7, p. 918-932, 1994.
- BRAGLIA, M.; ZANONI, S.; ZAVANELLA, L., Layout design in dynamic environments: strategies and quantitative indices. **International Journal of Production Research**, v. 41, n. 5, p. 995-1016, 2003.
- BRILL, D.; MANDELBAUM, M., On measures of flexibility in manufacturing systems. **International Journal of Production Research**, v. 27, n. 5, p. 747-756, 1989.
- BROWNE, J.; DUBOIS, D.; RATHMILL, K.; SETHI, S.P.; STECKE, K.E., Classification of flexible manufacturing systems. **The FMS Magazine**, v. 2, n. 2, p. 114-117, 1984.
- BUFFA, E.S.; ARMOUR, G.C.; VOLLMAN, T.E., Allocating facilities with CRAFT. **Harvard Business Review**, v. 42, n. 2, p. 136-159, 1964.

- BUZACOTT, J.A., The fundamental principles of flexibility in manufacturing systems. **Proceedings of the 1st International Congress on Flexible Manufacturing Systems**, Brighton, England, p. 13-22, 1982.
- CARLSSON, B., Management of flexible manufacturing: an international comparison. **Omega International Journal of Management Science**, v. 20, n. 1, p. 11-22, 1992.
- CERVO, A.R.; BERVIAN, P.A., **Metodologia Científica**. São Paulo: Prentice Hall, 2002.
- CHANG, A.Y., On the measurement of labor flexibility. **Proceedings IEEE International Engineering Management Conference**, p.163-167, 2004.
- CHEN, I.J.; CHUNG, C.H., An examination of flexibility measurements and performance of flexible manufacturing systems. **International Journal of Production Research**, v. 34, n. 2, p. 379-394, 1996.
- COHEN, L., **Quality function deployment: How to make QFD work for you**. New York: Addison-Wesley, 1995.
- CORRÊA, H.L.; SLACK, N., Flexibilidade estratégica na manufatura: incertezas e variabilidade de saída. **Revista de Administração da USP**, v. 9, 1994.
- COX, T., Toward the measurement of manufacturing flexibility. **Production and Inventory Management Journal**, v. 30, n. 1, p. 68-72, 1989.
- DA SILVEIRA, G., A framework for the product variety. **International Journal of Operations & Production Management**, v. 18, n. 3, p. 271-285, 1998.
- D'ANGELO, A.; GASTALDI, M.; LEVIALDI, N., Production variability and shop configuration: an experimental analysis. **International Journal of Production Research**, v. 68, n. 1, p. 43-57, 2000.
- DAS, B.J.; CHAPPELL, W.G.; SHUGHART, W.F., Demand fluctuation and firm heterogeneity. **Journal of Industrial Economics**, v. 41, n. 1, p. 51-60, 1993.
- DAS, S.K., The measurement of flexibility in manufacturing systems. **The International Journal of Flexible Manufacturing Systems**, n. 8, n. 1, p. 67-93, 1996.
- DE MEYER, A.; NAKANE, J.; MILLER, J.G.; FERDOWS, K., Flexibility: the next competitive battle manufacturing futures survey. **Strategic Management Journal**, v. 10, n. 2, p. 135-144, 1989.
- DE TONI, A.; TONCHIA, S., Manufacturing flexibility: a literature review. **International Journal of Production Research**, v. 36, n. 6, p. 1587-1617, 1998.
- DEBA,S.K.; Bhattacharyya, B., Fuzzy decision support system for manufacturing facilities layout planning. **Decision Support Systems**, v. 40, n. 2, p. 305– 314, 2005.
- DIXON, J.R., Measuring manufacturing flexibility: an empirical investigation. **European Journal of Operational Research**, n. 60, n. 2, p. 131-143, 1992.
- D'SOUZA, D.E.; WILLIAMS, F.P., Toward a taxonomy of manufacturing dimensions. **Journal of Operations Management**, v. 18, n. 5, p. 577-593, 2000.
- DUNKER, T.; RADONS, G.; WESTKÄMPER, E., Combining evolutionary computation and dynamic programming for solving a dynamic facility layout problem. **European Journal of Operational Research**, v. 165, n. 1, p. 55-69, 2005.
- DUTTA, K.N.; SAHU, S., A multigoal heuristic for facilities design problems: MUGHAL. **International Journal of Production Research**, v. 20, n. 2, p. 147-154, 1982.

- DWEIRI, F., Fuzzy development of crisp activity relationship charts for facilities layout. **Computers & Industrial Engineering**, v. 36, n. 1, p. 1-16, 1999.
- ELMARAGHY, H.A., Flexible and reconfigurable manufacturing systems. **International Journal of Flexible Manufacturing Systems**, v. 17, n. 4, p. 261-276, 2006.
- 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, n. 3, p. 237-262, 2006.
- ETTLIE, J.E.; PENNER-HAHN, J.D., Flexibility ratios and manufacturing strategy. **Management Science**, v. 40, n.1 1, p. 1444-1454, 1994.
- FIEGENBAUM, A.; KARNANI, A., Output flexibility — a competitive advantage for small firms. **Strategic Management Journal**, v. 12, n. 2, p. 101-114, 1991.
- FOGLIATTO, F.S.; DA SILVEIRA, G.J.C.; ROYER, R., Flexibility-driven index for measuring mass customization feasibility on industrialized products. **International Journal of Production Research**, v. 41, n. 8, p. 1811-1829, 2003.
- FOULDS, L.R., Techniques for facilities layout: deciding which pairs of activities should be adjacent. **Management Science**, v. 29, n. 12, p. 1414-1426, 1983.
- FRANCIS, R.L.; MCGINNIS JR, L.F.; WHITE, J.A., **Facility Layout and Location: an analytical approach**. Upper Saddle River: Prentice Hall, 1992.
- FU, M.C.; KAKU, B.K., Minimizing work-in-process and material handling in the facilities layout problem. **Technical report**, Institute for Systems Research, University of Maryland, College Park, MD., 1994.
- GARCIA, E.A.C., **Manual de sistematização e normalização de documentos técnicos**. São Paulo: Atlas, 1998.
- GERWIN, D., Do's and don'ts of computadorised manufacture. **Harward Business Review**, v. 60, n. 2, p. 107-116, 1982.
- GERWIN, D., An agenda for research on the flexibility of manufacturing processes. **International Journal of Operations & Production Management**, v. 7, n. 1, p. 38-49, 1987.
- GERWIN, D., Manufacturing flexibility: a strategic perspective. **Management Science**, v. 39, n. 4, p. 395-410, 1993.
- GROOVER, M.P., **Automation, Production Systems and Computer Integrated Manufacturing**. New Jersey: Prentice Hall, 2001.
- GUPTA, A.B., Managing the manufacturing flexibility in a piston ring manufacturing plant - a case study. **Global Journal of Flexible Systems Management**, v. 4, n. 1-2, p. 49-56, 2003.
- GUPTA, D., On measurement and valuation of manufacturing flexibility. **International Journal of Production Research**, v. 31, n. 12, p. 2947-2958, 1993.
- GUPTA, R.M.; Tompkins, J.A., An examination of the dynamic behaviour of part-families in group terchnology. **International Journal of Production Research**, v. 20, n. 1, p. 73-86, 1982.
- GUPTA, Y.P.; GOYAL, S., Flexibility of manufacturing systems:concepts and measurements. **European Journal of Operational Research**, n. 43, n. 2, p. 119-135, 1989.

- GUPTA, Y.P.; GOYAL, S., Flexibility trade-offs in a random flexible manufacturing system: a simulation study. **International Journal of Production Research**, v. 30, n. 3, p. 527-557, 1992.
- GUPTA, Y.P.; SOMERS, T.M., The measurement of manufacturing flexibility. **European Journal of Operational Research**, n. 60, n. 2, p. 166-182, 1992.
- GUPTA, D.; BUZACOTT, J.A., A framework for understanding flexibility of manufacturing systems. **Journal of Manufacturing Systems**, v. 8, n. 2, p. 89-97, 1989.
- GUSTAVSSON, S.O., Flexibility and productivity in complex production process. **International Journal of Production Research**, v. 22, n. 5, p. 801-808, 1984.
- HARMONOSKY, C.M.; TOTTERO, G.K., A multi-factor plant layout methodology. **International Journal of Production Research**, v. 30, n. 8, p. 1773-1789, 1992.
- HASSAN, M.M.D., Machine layout problem in modern manufacturing facilities. **International Journal of Production Research**, v. 32, n. 11, p. 2559-2584, 1994.
- HERAGU, S.; ZIJM, H., Design and performance evaluation of agile manufacturing systems. **Working Paper**, Faculty of Mathematical Sciences, University of Twente, Enschede, NL., 2001.
- HERAGU, S.S.; KUSIAK, A., Machine layout problem in flexible manufacturing systems. **Operations Research**, v. 36, n. 2, p. 258-268, 1988.
- HERAGU, S.S.; KUSIAK, A., Machine layout: an optimization and knowledge-based approach. **International Journal of Production Research**, v. 28, n. 4, p. 615-635, 1990.
- HERAGU, S.S.; KUSIAK, A., Efficient models for the facility layout problem. **European Journal of Operational Research**, v. 53, n. 1, p. 1-13, 1991.
- HYUN, J.H.; AHN, B.H., A unifying framework for manufacturing flexibility. **Manufacturing Review**, v. 5, n. 4, p. 251-259, 1992.
- IOANNOU, G.; MINIS, I., A review of current research in manufacturing shop design integration. **Journal of Intelligent Manufacturing**, v. 9, n. 1, p. 57-72, 1998.
- IRANI, S.A.; HUANG, H., Cascading flowlines and layout modules: practical strategies for machine duplication in facility layouts. **International Journal of Flexible Manufacturing Systems**, v. 17, n. 2, p. 119-149, 2006.
- JAICUMAR, R., Postindustrial manufacturing. **Harvard Business Review**, v. 64, n. 4, p. 69-76, 1986.
- KAHYAOGLU, Y.; KAYALIGIL, S.; BUZACOTT, J.A., Flexibility analysis: a methodology and a case study. **International Journal of Production Research**, v. 40, n. 16, p. 4111-4130, 2002.
- KAKU, B.K.; RACHAMADUGU, R., Layout design for flexible manufacturing systems. **European Journal of Operational Research**, v. 57, n. 2, p. 224-230, 1992.
- KARA, S.; KAYIS, B., Manufacturing flexibility and variability: an overview. **Journal of Manufacturing Technology Management**, v. 15, n. 6, p. 466-478, 2004.
- KARUPPAN, C.M.; GANSTER, D.C., The labor-machine dyad and its influence on mix flexibility. **Journal of Operations Management**, v. 22, n. 6, p. 533-556, 2004.
- KOCHHAR, J.S.; HERAGU, S.S., Facility layout design in a changing environment. **International Journal of Production Research**, v. 37, n. 11, p. 2429-2446, 1999.

- KOSTE, L.L.; MALHOTRA, M.K., A theoretical framework for analyzing the dimensions of manufacturing flexibility. **Journal of Operations Management**, v. 18, n. 1, p. 75–93, 1999.
- KOSTE, L.L.; MALHOTRA, M.K., Trade-offs among the elements of flexibility: a comparison from the automotive industry. **Omega**, v. 28, n. 6, p. 693-710, 2000.
- KOSTE, L.L.; MALHOTRA, M.K.; SHARMA, S., Measuring dimensions of manufacturing flexibility. **Journal of Operations Management**, v. 22, n. 2, p. 171-196, 2004.
- KOUVELIS, P.; CHIANG, W-C.; KIRAN, A.S., A survey of layout issues in flexible manufacturing systems. **Omega International Journal of Management Science**, v.20, n.3, p.375-390, 1992.
- KRAJEWSKI, L.J.; RITZMAN, L.P., **Operations management: strategy and analysis**. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2002.
- KULTUREL-KONAC, S.; SMITH, A.E.; NORMAN, B.A., Layout optimization considering production uncertainty and routing flexibility. **International Journal of Production Research**, v. 42, n. 21, p. 4475-4493, 2004.
- KUMAR, V., Entropic measures of manufacturing flexibility. **International Journal of Production Research**, v. 25, n. 7, p. 957-966, 1987.
- KUSIAK, A.; HERAGU, S.S., The facility layout problem. **European Journal of Operational Research**, v. 29, n. 3, p. 229-251, 1987.
- LACKSONEN, T.A., Preprocessing for static and dynamic facility layout problems. **International Journal of Production Research**, v. 35, n. 4, p. 1095-1106, 1997.
- LACKSONEN, T.A.; EMORY ENSCORE, E., Quadratic assignment algorithms for the dynamic layout problem. **International Journal of Production Research**, v. 31, n. 3, p. 503-517, 1993.
- LAHMAR, M.; BENJAAFAR, S., Design of dynamic distributed layouts. **Working Paper**, Department of Mechanical Engineering, University of Minnesota, Minneapolis, 2002.
- LAHMAR, M.; BENJAAFAR, S., Design of distributed layouts. **IIE Transactions**, v. 37, n. 4, p. 303-318, 2005.
- LAKATOS, E.M.; MARCONI, M.A., **Fundamentos de metodologia científica**. São Paulo: Atlas, 1993.
- LAU, R.S.M., Critical factors for achieving manufacturing flexibility. **International Journal of Operations & Production Management**, v. 19, n. 3, p. 328-341, 1999.
- LEE, Q., **Projeto de instalações e do local de trabalho**. São Paulo: IMAM, 1998.
- LIM, S.H., Flexible Manufacturing Systems and manufacturing flexibility in the United Kingdom. **International Journal of Operations & Production Management**, v. 7, n. 6, p. 44-54, 1987.
- LIN, L.C.; SHARP, G.P., Quantitative and qualitative indices for the plant layout evaluation problem. **European Journal of Operational Research**, v. 116, n. 1, p. 100-117, 1999a.
- LIN, L.C.; SHARP, G.P., Application of the integrated framework for the plant layout evaluation problem. **European Journal of Operational Research**, v. 116, n. 1, p. 118-138, 1999b.
- MANDELBAUM, M.; BUZACOTT, J., Flexibility and decision making. **European Journal of Operational Research**, v. 44, n. 1, p. 17-27, 1990.

- MELLER, R.D.; GAU, K.Y., The facility layout problem: recent and emerging trends and perspectives. **Journal of Manufacturing Systems**, v. 15, n. 5, p. 351-366, 1996a.
- MELLER, R.D.; GAU, K.Y., Facility layout objective functions and robust layouts. **International Journal of Production Research**, v. 34, n. 10, p. 2727-2742, 1996b.
- MENG, G.; HERAGU, S.S.; ZIJM, H., Reconfigurable layout problem. **International Journal of Production Research**, v. 42, n. 22, p. 4709-4729, 2004.
- MONTREIL, B.; VENKATADRI, U., Strategic interpolative design of dynamic manufacturing systems layouts. **Management Science**, v. 37, n. 6, p. 682-694, 1991.
- MONTREIL, B.; VENKATADRI, U.; RARDIN, R.L., Fractal layout organization for job shop environments. **International Journal of Production Research**, v. 37, n. 3, p. 501-521, 1999.
- MONTREIL, B.; LAFORGE, A., Dynamic layout design given a scenario tree of probable futures. **European Journal of Operational Research**, v. 63, n. 2, p. 271-286, 1992.
- MUTTER, R., **Planejamento do layout: sistema SLP**. São Paulo: Edgard Blucher, 1978.
- NAGARUR, N., Some performance measures of flexible manufacturing systems. **International Journal of Production Research**, v. 30, n. 4, p. 799-809, 1992.
- NARAIN, R.; YADAV, R.C.; SAKIS, J.; CORDEIRO, J.J., The strategic implications of flexibility in manufacturing systems. **International Journal of Agile Mangement Systems**, v. 2, n. 3, p. 202-213, 2000.
- NEWMAN, W.R.; HANNA, M.; MAFFEI M.J., Dealing with the uncertainties uncertainties of of manufacturing: flexibility, buffers and integration. **International Journal of Operations & Production Management**, v. 12, n. 1, p. 19-34, 1993.
- NORMAN, B. A.; SMITH, A. E., A continuous approach to considering uncertainty in facility design. **Computers and Operations Research**, v. 33, n. 6, p. 1760-1775, 2006.
- OKE, A., Drivers of volume flexibility requirements in manufacturing plants. **International Journal of Operations & Production Management**, v. 23, n. 12, p. 1497-1513, 2003.
- OKE, A., A framework for analysing manufacturing flexibility. **International Journal of Operations & Production Management**, v. 25, n. 10, p. 973-996, 2005.
- OLHAGER, J., Manufacturing flexibility and profitability. **International Journal of Production Economics**, v. 30-31, n. 1, p. 67-78, 1993.
- PALEKAR, U.S.; BATTI, R.; ELHENCE, S., Modeling uncertainties in plant layout problems. **European Journal of Operational Research**, v. 63, n. 2, p. 347-359, 1992.
- PARKER, R. P.; WIRTH, A., Manufacturing flexibility: measures and relationships. **European Journal of Operational Research**, v. 118, n. 3, p. 429-449, 1999.
- PINFIELD, L.; ATKINSON, J.S., The flexible firm. **Canadian Business Review**, v. 15, n. 4, p. 17-19, 1988.
- PRAMOD, M. ; GARG, S., Analysis of flexibility requeriments under uncertain environments. **Journal of Modelling in Management**, v. 1, n. 3, p. 196-214, 2006.
- RAMAN,D.; NAGALINGAM, S.V.; CHIO, M., A fuzzy rule based system to measure facility layout flexibility. **18th International Conference on Production Research**. Fisciano (AS), Italy: University of Salerno, 2005.

- RAMAN,D.; NAGALINGAM, S.V.; GURD, B.W.; LIN, G.C.I., Effectiveness measurement of facilities layout. **Proceedings 35th International Matador Conference** , p. 165-169, 2007.
- RAMAN,D.; NAGALINGAM, S.V.; GURD, B.W.; LIN, G.C.I., Quantity of material handling equipment—A queuing theory based approach. **Robotics and Computer-Integrated Manufacturing**, v. 25, n. 2, p. 348-357 , 2009b.
- RAMAN,D.; NAGALINGAM, S.V.; LIN, G.C.I., Towards measuring the effectiveness of a facilities layout. **Robotics and Computer-Integrated Manufacturing**, v. 25, n. 1, p. 191-203, 2009a.
- RAMASESH, R.V.; JAYAKUMAR, M.D., Measurement of manufacturing flexibility: a value based approach. **Journal of Operations Management**, v. 10, n. 4, p. 446-468, 1991.
- REED, R. JR., Plant Layout: factors, principles and techniques. Illinois: Richard D. Irwin, 1961.
- ROSENBLATT, M.J., The facilities layout problem: a multi-goal approach. **International Journal of Production Research**, v. 17, n. 4, p. 323-332, 1979.
- ROSENBLATT, M.J., The dynamics of plant layout. **Management Science**, v. 32, n. 1, p. 76-86, 1986.
- ROSENBLATT, M.J.; LEE, H.L., A robustness approach to facilities design. **International Journal of Production Research**, v. 25, n. 4, p. 479-486, 1987.
- SAFIZADEH, H.M.; RITZMAN, L.P.; SHARMA, D.; WOOD, C., An empirical analysis of the product-process matrix. **Management Science**, v. 42, n. 11, p. 1576–1591, 1996.
- SCHMENNER, R.W.; TATIKONDA, M.V., Manufacturing process flexibility revisited. **International Journal of Operations & Production Management**, v. 25, n. 12, p. 1183-1189, 2005.
- SETHI, A.K.; SETHI, S.P., Flexibility in manufacturing: a survey. **The International Journal of Flexible Manufacturing Systems**, v. 2, n. 4, p. 289-328, 1990.
- SHEWCHUK, J.P., A set of generic flexibility measures for manufacturing applications. **International Journal of Production Research**, v. 37, n. 13, p. 3017-3042, 1999.
- SHEWCHUK, J.P.; MOODIE, C.L., Definition and classification of manufacturing flexibility types and measures. **The International Journal of Flexible Manufacturing Systems**, v. 10, n. 4, p. 325-349, 1998.
- SHEWCHUK, J.P.; MOODIE, C.L., Flexibility and manufacturing system design: an experimental investigation. **International Journal of Production Research**, v. 38, n. 8, p. 1801-1822, 2000.
- SILVA, E.L.S.; MENEZES, E.M., Metodologia de pesquisa e elaboração de dissertação. Florianópolis: UFSC, 2000.
- SINGH, S.P.; SHARMA, R.R.K., A review of different approaches to the facility layout problems. **International Journal of Advanced Manufacturing Technologies**, v. 30, n. 5-6, p. 425-433, 2006.
- SLACK, N., Flexibility as a manufacturing objective. **International Journal of Operations & Production Management**, v. 3, n. 3, p. 4-13, 1983.
- SLACK, N., The flexibility of manufacturing systems. **International Journal of Operations & Production Management**, v. 7, n. 4, p. 35-45, 1987.

- SLACK, N., The changing nature of operations flexibility. **International Journal of Operations & Production Management**, v. 25, n. 12, p. 1201-1210, 2005.
- SLACK, N.;CORREA, H., The flexibilities of push and pull. **International Journal of Operations & Production Management**, v. 12, n. 4, p. 82-92., 1992.
- SUAREZ, F. F.; CUSUMANO, M. A.; FINE, C.H., An empirical study of flexibility in manufacturing. **Sloan Management Review**, v. 37, n. 1, p. 25-32, 1995.
- SUAREZ, F. F.; CUSUMANO, M. A.; FINE, C.H., An empirical study of manufacturing flexibility in printed circuit board assembly. **Operations Research**, v. 44, n. 1, p. 223-240, 1996.
- SURESH, N.C.; GAALMAN, G.J.C., Performance evaluation of cellular layouts: extension to DRC system contexts. **International Journal of Production Research**, v. 38, n. 17, p. 4393-4402, 2000.
- SWAMIDASS, P.M.;NEWELL, W.T., Manufacturing strategy environmental uncertainty and performance: a path analytic model. **Management Science**, v. 33, n. 4, p. 509-524, 1987.
- TINCKNELL, D.J.; RADCLIFFE, D.F., A generic model of manufacturing flexibility based on system control hierarchies. **International Journal of Production Research**, v. 34, n. 1, p. 19-32, 1996.
- TOMBAK, M.; DE MEYER, A., Flexibility and FMS: an empirical analysis. **IEEE Transactions on Engineering Management**, v. 35, n. 2, p. 101-107, 1988.
- TOMPKINS, J.A.; WHITE, J.A.; BOZER, Y.A.; FRAZELLE, E.H.; TANCHOCO, J.M.A.; TREVINO, J., **Facilities planning**. New York: John Wiley & Sons, INC., 1996.
- TSOURVELOUDIS, N.C.; PHILLIS, Y.A., Manufacturing flexibility measurement: a fuzzy logic framework. **IEEE Transactions on Robotics and Automation**, v. 14, n. 4, p. 513-524, 1998.
- TURATTO, R.R.T., Estudo de melhorias do layout produtivo no processo de fabricação de equipamentos para indústrias de bebidas. **Trabalho de Diplomação**. Escola de Engenharia, Departamento de Engenharia de Produção, Universidade Federal do Rio Grande do Sul: Porto Alegre, 2008
- ULUTAS, B.; ISLIER, A.A., A new approach to the dynamic layout problem. **Proceedings 35th International Conference on Computers and Industrial Engineering**, p. 2019-2024, 2005.
- UPTON, D.M., The management of manufacturing flexibility. **California Management Review**, v. 36, n. 2, p. 72 -89, 1994.
- UPTON, D.M., CIM flexibility measures: A review and a framework for analysis and applicability assessment. **Journal of Operations Management** , v. 13, n. 3-4, p. 205-224, 1995.
- UPTON, D.M., Process range in manufacturing: an empirical study of flexibility. **Management Science**, v. 43, n. 8, p. 1079-1092, 1997.
- URBAN T.L., A multiple criteria model for the facilities layout problem. **International Journal of Production Research**, v. 25, n. 12, p. 1805-1812, 1987.
- URBAN T.L., Computational performance and efficiency of lower-bound procedures for the dynamic facility layout problem. **European Journal of Operational Research**, v. 57, n. 2, p. 271-279, 1992.

- URBAN T.L., Solution procedures for the dynamic facility layout problem. **Annals of Operations Research**, n. 76, n. 1, p. 323-342, 1998.
- VENKATADRI, U.; RARDIN, R.L.; MONTREIL, B., A design methodology for fractal layout organization. **IIE Transactions**, v. 29, n. 10, p. 911-924, 1997.
- VICKERY, S.K.; DROGE, C.; MARKLAND, R.E., Dimensions of manufacturing strength in the furniture industry. **Journal of Operations Management**, v. 15, n. 4, p. 317-330, 1997.
- VOKURKA, R.J.; O'LEARY-KELLY, S.W., A review of empirical research on manufacturing flexibility. **Journal of Operations Management**, v. 18, n. 4, p. 485-501, 2000.
- VOLLMANN, T.E.; BUFFA, E.S., The facilities layout problem in perspective. **Management Science**, v. 12, n. 10, p. B540-B468, 1966.
- WAHAB, M.I.M., Measuring machine and product mix flexibilities of a manufacturing system. **International Journal of Production Research**, v. 42, n. 18, p. 3773-3786, 2005.
- WAHAB, M.I.M.; WU, D.; LEE, C., A generic approach to measuring the machine flexibility of manufacturing systems. **European Journal of Operational Research**, v. 186, n. 1, p. 137-149, 2008.
- WARD, P.T.; DURAY, R.; LEONG, G.K.; SUM, C., Business environment, operations strategy, and performance: an empirical study of Singapore manufacturers. **Journal of Operations Management**, v. 13, n. 2, p. 99-115, 1995.
- WEBSTER, D.B.; TYBERGHEIN, M.B., Measuring flexibility of job-shop layouts. **International Journal of Production Research**, v. 18, n. 1, p. 21-29, 1980.
- WILSON, R.C., Some observations on facility design. Capturado da internet do site: deepblue.lib.umich.edu, 1962.
- WRENNALL, W. Facilities Planning and Design: A Foundation of the BPR Pyramid. **Industrial Management**, vol. 39, n. 4, p. 7-11, 1997.
- YANG, T.; KUO, C., A hierarchical AHP/DEA methodology for the facilities layout design problem. **European Journal of Operational Research**, v. 147, n. 1, p. 128-136, 2003.
- YANG, T.; PETERS, B.A., Flexible machine layout design for dynamic and uncertain production environments. **European Journal of Operational Research**, v. 108, n. 1, p. 49-64, 1998.
- ZELENOVIC, D., A condition for effective production systems. **International Journal of Production Research**, v. 20, n. 3, p. 319-337, 1982.

APÊNDICE A – Indicadores utilizados

Neste apêndice, se elencam os indicadores definidos para medir os fatores terciários que são utilizados para medir a flexibilidade de *layout*. Também se detalha a forma de medição de cada um. Alguns itens são finalizados apresentando informações complementares sobre o indicador.

- Grau de adequação do sistema de produção ao volume de produção - atribuir nota subjetiva, de 0 a 10, com onde o limite inferior representa que não existe nenhuma adequação do sistema de produção ao volume de produção e o limite superior representa que existe completa adequação do indicador. Para maiores detalhes ver seção 2.3.1.
- Grau de facilidade de adequar o *mix* - atribuir nota subjetiva, de 0 a 10, onde o limite inferior representa que não existe nenhuma facilidade de adequar o *mix* e o limite superior representa que existe total facilidade de adequar o *mix*. A adequação implica em analisar majoritariamente os recursos internos, como máquinas, força de trabalho, materiais e fluxos gerados.
- Grau de facilidade de aumentar capacidade produtiva - atribuir nota subjetiva, de 0 a 10, onde o limite inferior representa que não existe nenhuma facilidade de aumentar capacidade produtiva e o limite superior representa que existe total facilidade de aumentar capacidade produtiva. A facilidade implica em equacionar o que já existe, junto com os investimentos que serão necessários e os ganhos que advirão.
- Grau de facilidade de estabelecer rotas alternativas - atribuir nota subjetiva, de 0 a 10, onde o limite inferior representa que não existe nenhuma facilidade de estabelecer rotas alternativas e o limite superior representa que existe total facilidade de estabelecer rotas alternativas.
- Grau de facilidade de lançar novos produtos - atribuir nota subjetiva, de 0 a 10, onde o limite inferior representa que não existe nenhuma facilidade de lançamento de novos produtos e o limite superior representa que existe total facilidade de lançamento de novos produtos.
- Grau de frequência de rearranjo - atribuir nota subjetiva, de 0 a 10, onde o limite inferior representa que não é freqüente rearranjar máquinas/departamentos e o limite superior representa que é muito freqüente rearranjar máquinas/departamentos.

- Grau de inovação dos novos produtos - atribuir nota subjetiva, de 0 a 10, onde o limite inferior representa que não existe nenhuma inovação nos novos produtos e o limite superior representa que a inovação nos novos produtos é máxima. Se o grau de inovação dos produtos é alto, a flexibilidade da instalação também é.
- Grau de qualidade dos produtos - atribuir nota subjetiva, de 0 a 10, onde o limite inferior representa que a qualidade dos produtos é extremamente baixa e o limite superior representa que a qualidade dos produtos é excelente.
- Grau de similaridade entre os novos produtos e os antigos - atribuir nota subjetiva, de 0 a 10, onde o limite inferior representa que a similaridade entre os novos produtos e os antigos é extremamente baixa e o limite superior representa que a similaridade entre os novos produtos e os antigos é alta.
- Grau de variação de peso do sistema de movimentação - atribuir nota subjetiva, de 0 a 10, onde o limite inferior representa que o sistema de movimentação não permite nenhuma variação em peso e o limite superior representa que sistema de movimentação permite qualquer variação em peso.
- Grau de variação de volume do sistema de movimentação - atribuir nota subjetiva, de 0 a 10, onde o limite inferior representa que o sistema de movimentação não permite nenhuma variação em volume e o limite superior representa que sistema de movimentação permite qualquer variação em volume.
- Grau de variedade do *mix* - atribuir nota subjetiva, de 0 a 10, onde o limite inferior representa que não existe nenhuma variedade do *mix* e o limite superior representa que existe total variedade do *mix*. A variedade do *mix* implica em analisar majoritariamente os recursos externos, como desejos dos clientes, o que vem sendo oferecido, embora não se despreze os recursos internos para produção.
- Proporção da produção *Just in time* - realizar o somatório do faturamento da produção que acontece *Just in time* e dividir pelo faturamento total da produção.
- Proporção da produção para atender pedidos programados - realizar o somatório do faturamento da produção que é utilizado para atender pedidos programados e dividir pelo faturamento total da produção.
- Proporção da quantidade de novos produtos lançados num ano - realizar o somatório da quantidade de novos produtos lançados num ano e dividir pelo somatório da quantidade ideal de novos produtos lançados. A quantidade ideal é a do melhor concorrente.

- Proporção de área de armazenamento - realizar o somatório das áreas de armazenamento (incluir áreas que armazenam matérias primas, produto em processamento e produto acabado) e dividir pela área ideal. O cálculo foi realizado desta forma por pressupor necessidade de aumentar área de armazenamento. Se houver necessidade de diminuir, deve-se utilizar o inverso.
- Proporção de área disponível para expansão futura - determinar o somatório das áreas disponíveis para expansão futura e dividir pelo total da área. Empresas modernas costumam deixar 15% de suas áreas para expansão ou mudanças de *layout*. Além disto, os espaços livres podem estar sendo usados como buffers ou áreas para estocar produto temporariamente (TOMPKINS *et al.*, 1996; LIN E SHARP, 1997a). Chama-se atenção para considerar somente as áreas que tem possibilidade real de acomodar alguma máquina ou departamento.
- Proporção de área produtiva - realizar o somatório das áreas produtivas e dividir pela área total. Por áreas produtivas entendem as áreas onde acontecem as operações propriamente ditas. Dentro do departamento, considerar áreas de circulação, corredores e de segurança como produtivas.
- Proporção de área sem restrições - determinar o somatório das áreas produtivas que não apresentam restrições e dividir pelo total da área produtiva. As restrições são representadas por partições/paredes, colunas, elevadores/escadas. Determinadas paredes podem influenciar a alocação de departamentos, possibilidade de expansão futura, arranjos de corredores e distâncias percorridas pelo sistema de movimentação. Colunas podem afetar a disposição de máquinas e departamentos. Elevadores e escadas podem afetar o método de movimentação empregado, a distância percorrida e a utilização do espaço. As restrições que são permanentes (e não podem ser removidas) causam mais inflexibilidade do que as móveis que pode ser deslocadas ou retiradas (LIN E SHARP, 1997a).
- Proporção de área servida pelo sistema de movimentação - realizar o somatório das áreas servidas pelo sistema de movimentação e dividir pelo total da área produtiva. Áreas que não são servidas pelo sistema de movimentação são áreas que podem apresentar limitações ao rearranjo (LEE, 1998).
- Proporção de área servida por corredores - realizar o somatório das áreas servidas por corredores e dividir pelo total da área produtiva. Os corredores dão suporte ao fluxo

de material e de pessoas entre os departamentos e facilitam o acesso (LIN E SHARP, 1997a).

- Proporção de contenedores multi uso - realizar o somatório do número de contenedores multi uso e dividir pelo somatório do número de contenedores total. Como contenedor multi uso, foi definido um contenedor que é utilizado por no mínimo dois produtos/setores
- Proporção de departamentos com adjacência correta - utilizar duas matrizes quadradas e preencher com informações binárias (sim ou não). Na primeira matriz se preenche se o departamento é ou não é adjacente de outro atualmente. Na segunda matriz se preenche se o departamento deveria ou não ser adjacente de outro, considerando o processo de fabricação. Ao final realizar o somatório de departamentos que estão com adjacência correta e dividir pelo total de relações de adjacências consideradas.
- Proporção de departamentos com área adequada - realizar o somatório dos departamentos com área adequada e dividir pelo total de departamentos. De acordo com Lin e Sharp (1997a), departamentos muito grandes podem ser subdivididos e pode se estabelecer corredores entre os mesmos. Em termos de flexibilidade eles são prejudiciais se existe uma grande densidade de fluxo em torno dos mesmos.
- Proporção de departamentos com forma geométrica adequada - realizar o somatório do número de departamentos com forma geométrica adequada e dividir pelo total de departamentos. De acordo com Lin e Sharp (1997a), em departamentos muito longos e estreitos pode existir dificuldade de reposicionamento de máquinas, de acesso e de rearranjo entre departamentos.
- Proporção de departamentos formados por tecnologia de grupo - realizar o somatório dos departamentos formados por tecnologia de grupo e dividir pelo total da área produtiva. Os departamentos formados por tecnologia de grupo (cujo *layout* foi adequado ao *layout* celular), de forma geral, simplificam o fluxo entre departamentos funcionais, otimizam o fluxo dentro do departamento e pressupõem uma certa evolução em termos de *layout*, representando um incremento em termos de flexibilidade. Para maiores detalhes ver seção 2.3.1.
- Proporção de departamentos que podem aumentar capacidade produtiva - realizar o somatório do número de departamentos que podem aumentar capacidade produtiva e dividir pelo total de departamentos.

- Proporção de máquinas de pequeno porte - realizar o somatório do número de máquinas de pequeno porte em cada departamento e dividir pelo somatório do número de máquinas total.
- Proporção de máquinas com operações otimizadas - realizar o somatório do número de máquinas com operações otimizadas em cada departamento e dividir pelo somatório do número de máquinas total.
- Proporção de máquinas com *setup* otimizado - realizar o somatório do número de máquinas com *setup* otimizado em cada departamento e dividir pelo somatório do número de máquinas total. Por *setup* otimizado se entende que na empresa já foi realizado um estudo preliminar para reduzir os tempos de *setup*.
- Proporção de máquinas duplicadas - realizar o somatório do número de máquinas duplicadas em cada departamento e dividir pelo somatório do número de máquinas total. Para maiores detalhes ver seção 2.3.1.4.
- Proporção de máquinas interligadas pelo sistema de movimentação - realizar o somatório do número de máquinas que são interligadas pelo sistema de movimentação em cada departamento e dividir pelo somatório do número de máquinas total.
- Proporção de máquinas multifuncionais - realizar o somatório do número de máquinas multifuncionais em cada departamento e dividir pelo somatório do número de máquinas total.
- Proporção de operações que máquina típica pode executar - realizar o somatório do número de operações que máquina típica de um departamento pode executar e dividir pelo somatório do número ideal de operações.
- Proporção de operações que operador sabe executar - realizar o somatório do número de operações que operador sabe executar em cada departamento e dividir pelo somatório do número ideal de operações.
- Proporção de operadores multifuncionais - realizar o somatório do número de operadores multifuncionais em cada departamento e dividir pelo somatório do número de operadores total. Como um operador multi treinado, foi definido um operador que realiza bem, pelo menos duas operações, sendo treinado para tal.
- Proporção de peças com rotas alternativas de processamento - realizar o somatório do número de peças com rotas alternativas de processamento e dividir pelo número total de peças.

- Proporção de pedidos atendidos - realizar o somatório do número de pedidos atendidos e verificar sua proporção no número total de pedidos. Pedidos não efetivados por falta de capacidade produtiva podem significar necessidade de otimização dos recursos internos ou de expansão de capacidade produtiva.
- Proporção de processos mapeados - realizar o somatório do número de processos que estão mapeados em termos de levantamento de tempo e dividir pelo somatório do número de processos. O objetivo de mapear formalmente o processo (utilizando cronômetro) é de entender o processo, suas principais deficiências e oportunidades de melhoria.
- Proporção de produtos com mercado consolidado - realizar o somatório dos produtos com mercado consolidado e dividir em relação ao total de produtos. Neste indicador, produtos com mercado consolidado significam produtos que a empresa já tem o domínio em termos de produção, de materiais, de propriedades, confiabilidade, etc.
- Proporção de tempo inoperante das máquinas - realizar o somatório dos tempos inoperantes em um dia tomando máquinas típicas de cada departamento e dividir pelo tempo total de operação (8 horas).
- Proporção de tempo que o sistema de movimentação não é utilizado— alvo: 1 - realizar o somatório dos tempos de utilização do sistema de movimentação em cada departamento e dividir pelo tempo total de operação (8 horas).
- Proporção do *mix* que é produzido na planta - realizar o somatório do faturamento do *mix* que é produzido na planta e dividir pelo somatório do faturamento do *mix* total (o que é produzido na planta acrescido do que é terceirizado, comprado). Alternativamente ao faturamento, pode-se utilizar número de peças do *mix*.
- Razão da distância ideal/real para produzir produto típico - realizar o somatório das distâncias ideais percorridas pelas peças p/produzir produto típico entre departamentos (utilizar uma matriz quadrada com os mesmos departamentos na linha e na coluna) e dividir pelo somatório dos valores reais de distâncias percorridas entre departamentos.
- Razão de tempo de processamento ideal/real - realizar o somatório dos tempos ideais de processamento em cada departamento e dividir pelo somatório dos tempos reais de processamento. Tempos de processamento se referem aos tempos totais para produzir um produto típico completo e tem relação com a realização de práticas de melhoria.

- Razão de tempo de *setup* ideal/real - realizar o somatório tempo ideais de *setup* para cada departamento e dividir pelo somatório dos tempos reais de *setup* de cada departamento.
- Razão de tempo para lançamento ideal/real de novos produtos - realizar o somatório dos tempos ideais para lançamento de novos produtos e dividir pelo somatório dos tempos reais para lançamento de novos produtos. O tempo ideal é tomado como o tempo do melhor concorrente.
- Razão do custo ideal/real de processamento - realizar o somatório dos custos ideais de processamento para cada departamento e dividir pelo somatório dos custos reais de processamento de cada departamento.
- Razão do custo ideal/real de *setup* - realizar o somatório dos custos ideais de *setup* para cada departamento e dividir pelo somatório dos custos reais de *setup* de cada departamento.
- Razão do número de cruzamentos de fluxos ideal/real - realizar o somatório do número ideal de cruzamentos de fluxos entre todos os departamentos e dividir pelo somatório do número de cruzamentos real, considerando restrições.

