Biblioteca Universitária
UFSC

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

TULIO DOS SANTOS DANNI

AJUSTE E ESTUDO DO SISTEMA KANBAN AUXILIADO PELA SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA

BU

0.272.548-6

UFSC-BU

FLORIANÓPOLIS, JUNHO DE 1997

AJUSTE E ESTUDO DO SISTEMA KANBAN AUXILIADO PELA SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

TULIO DOS SANTOS DANNI

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE

MESTRE EM ENGENHARIA

ESPECIALIDADE EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO E APROVADA NA SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

PROF. RICARDO MIRANDA BARCIA, PH.D.
COORDENADOR DO CURSO

BANCA EXAMINADORA:

PROF. DALVIO FERRARI TUBINO, DR.
ORIENTADOR

PROF. PAULO JOSÉ DE FREITAS FILHO, DR.

GREGÓRIO J. VARVAKIS RADOS, PH.D.

AGRADECIMENTOS

Expresso meus sinceros agradecimentos:

Ao Prof. Dalvio Ferrari Tubino, pelo orientação no desenvolvimento e organização da pesquisa.

À UFSC, pela oportunidade concedida para a realização do Curso de Mestrado em Engenharia de Produção.

Ao CNPQ, pelo apoio financeiro concedido.

Aos meus pais e irmãos, pela afeto, orientação e apoio incondicional.

À todas as amizades feitas durante o mestrado e em especial ao pessoal da Servidão das Pitangas, pela alegria, companheirismo e pelos momentos inesquecíveis compartilhados.

RESUMO

Em uma sociedade onde os consumidores estão cada vez mais exigindo por qualidade nos produtos e nos serviços, e com os mercados globalizados, dinâmicos e altamente competitivos, há uma crescente preocupação nas empresas não só em manter, mas em incrementar seu desempenho no que diz respeito a qualidade e produtividade. Devido a estes fatos, as filosofias japonesas de manufatura e administração, especialmente a Filosofia *Just-in-Time* (JIT), têm-se mostrado tão atrativas.

O JIT é baseado no conceito de eliminação total das perdas do sistema produtivo através da estratégia de redução dos estoques. O sistema kanban age como a base do JIT, sendo a sua função direcionar a matéria prima somente quando necessário e na quantidade certa. Apesar do sistema kanban ser uma técnica simples, com a sua aplicação em diferentes situações nas quais as condições de operação da filosofia JIT não estejam plenamente concretizadas, gerou-se a necessidade de conhecer mais sobre como o sistema kanban se comporta e como pode ser otimizado na planta fabril. Assim, para que se possa obter os benefícios da utilização do kanban, o ajuste e compreensão do funcionamento do sistema kanbans é essencial.

Considerando os aspectos mencionados, tem-se como objetivo deste trabalho desenvolver uma metodologia para o ajuste dos parâmetros do sistema kanban que proporcione melhores condições de operação de acordo com as metas do JIT. Objetiva-se também analisar como os parâmetros do sistema kanban influenciam no comportamento do sistema produtivo, e quais as penalidades ao sistema kanban caso as condições de operação do JIT estejam abaixo do ideal.

ABSTRACT

In the nowadays society with a global economy, and consumers willing for cheaper and better products, there is a growing concern by a large number of companies in increasing the it's productivity and quality. By reason of that, the Just-in-Time (JIT) philosophy has been adopted by a large number of companies as way to regain the lost competitivity.

Just-in-Time philosophy is based on the concept of total elimination of waste in the production system throw the strategy of reducing inventory. To do so, the resources only produce in the quantity and time necessary. The kanban system act as the nerve of JIT, having the task to direct the flow of material in the quantity and time needed. To take all the benefits from the kanban system, it's essential to understand and adjust it's parameters. In this work, a methodology for adjusting the parameters of the kanban system is presented and applied to a hypothetical production system. The results also provide the possibility to analyze how the system reacts to different combinations of the kanban system parameters

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO **1**

1.1. CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA 1
1.2. OBJETIVO DO TRABALHO 3
1.2.1. OBJETIVO GERAL 3
1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS 3
1.3. IMPORTÂNCIA DO TRABALHO 4
1.4. LIMITAÇÕES DO TRABALHO 4
1.5. ESTRUTURA DO TRABALHO 4

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA **6**

2.1. A FILOSOFIA *JUST-IN-TIME* (JIT) 6
2.1.1. FERRAMENTAS DO JIT 7
2.1.1.1. PRODUÇÃO PUXADA 7
2.1.1.2. NIVELAMENTO DA PRODUÇÃO 8
2.1.1.3. MANUFATURA CELULAR 9
2.1.1.4. TROCA RÁPIDA DE FERRAMENTA 9
2.1.1.5. POLIVALÊNCIA DA MÃO-DE-OBRA 9
2.2. PLANEJAMENTO E CONTROLE DA PRODUÇÃO NO AMBIENTE JIT 10
2.3. FLUXO E CONTROLE DA PRODUÇÃO ATRAVÉS DO SISTEMA KANBAN 12
2.4. O AJUSTE DO SISTEMA KANBAN 15
2.5. A SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL 19
2.6. ESTUDOS DA BIBLIOGRAFIA 22
2.6.1. ESTUDOS ENVOLVENDO A MODELAGEM MATEMÁTICA 22
2.6.2. ESTUDOS COM SIMULAÇÃO 24

3. METODOLOGIA PROPOSTA **32**

3.1. METODOLOGIA DE AJUSTE DO SISTEMA KANBAN 32

3.2. SISTEMA DE AVALIAÇÃO 41
3.3. MODELO DA FÁBRICA JIT 43
3.3.1. ETAPAS DA SIMULAÇÃO DA FÁBRICA JIT 44
3.3.2. MODELO DO SISTEMA DE PRODUÇÃO DA FÁBRICA JIT 45
3.4. MODELO COMPUTACIONAL DE SIMULAÇÃO 48
3.4.1. SISTEMA KANBAN 49
3.4.2. SISTEMA TRANSPORTADOR 51
3.4.3. LINHA DE MONTAGEM 52
3.4.4. INTERFACE EXTERNA ARENA / PLANILHA ELETRÔNICA 53
3.4.5. RESTRIÇÕES E SIMPLIFICAÇÕES 53
3.5. SIMULAÇÃO DO MODELO COMPUTACIONAL 55

4. RESULTADOS 60

4.1. DESCRIÇÃO DOS PARÂMETROS DO SISTEMA PRODUTIVO 60
4.2. APLICAÇÃO DA METODOLOGIA À FÁBRICA JIT COM AS CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO DO CENÁRIO 1 62
4.2.1. ANÁLISE DAS MEDIDAS DE DESEMPENHO DO CENÁRIO 1 65
4.2.2. ESCOLHA DA FAIXA DE OPERAÇÃO DO SISTEMA KANBAN NO CENÁRIO 1 74
4.3. APLICAÇÃO DA METODOLOGIA A FÁBRICA JIT COM AS CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO DO CENÁRIO 2 76
4.3.1. ANÁLISE DAS MEDIDAS DE DESEMPENHO DO CENÁRIO 2 77
4.3.2. ESCOLHA DA FAIXA DE OPERAÇÃO DO SISTEMA KANBAN NO CENÁRIO 2 85
4.4. COMPARAÇÃO DO DESEMPENHO DA FÁBRICA JIT ENTRE OS CENÁRIOS 1 E 2 87

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕS 90

5.1. CONSIDERAÇÕES SOBRE OS RESULTADOS OBTIDOS 90
5.2. SUGESTÕES PARA ESTUDO POSTERIORES 93

6. BIBLIOGRAFIA 94

LISTA DE FIGURAS

Figura 1-1 *Estrutura do trabalho* 4

Figura 2-1 *Lógica de empurrar e puxar a produção.* 8

Figura 2-2 *Hierarquia das funções do PCP do sistema convencional de produção e do JIT.* 10

Figura 2-3 *Fluxo de informação para o controle de materiais do sistema de puxar* 13

Figura 2-4 *Comparação entre os custos envolvidos na determinação do tamanho do lote no sistema convencional de produção e no JIT.* 17

Figura 3-1 *Esquematização da metodologia proposta para o ajuste do sistema kanban.* 34

Figura 3-2: *Passos do ajuste do número de kanbans. Etapa 3, figura 3-1.* 36

Figura 3-3 *Passos da etapa de avaliação e verificação do sistema produtivo. Etapa 4 da figura 3-1.* 39

Figura 3-4 *Exemplo da aplicação da metodologia de ajuste do número de kanban.* 40

Figura 3-5 *Diagrama do fluxo e controle da produção do sistema em estudo.* 46

Figura 3-6 *Lógica do sistema kanban que controla o fluxo de peças dentro do centro de trabalho.* 50

Figura 3-7 *Lógica de controle dos kanbans de movimentação.* 51

Figura 3-8 *Lógica de controle do sistema transportador.* 52

Figura 3-9 *Lógica dos postos de montagem para operação com três peças diferentes.* 53

Figura 3-10 *Exemplo do comportamento dos valores do lead-time de produção* ... 58

Figura 4-1 *Gráfico da variação dos valores do lead-time médio e máximo de produção e de transporte em relação a variação da quantidade de peças por kanban - cenário 1.* 67

Figura 4-2 *Comportamento dos tempo que compõe o lead-time médio de produção em relação a variação da quantidade de peças por kanban - cenário 1.* 68

Figura 4-3 *Gráfico da variação do estoque máximo e médio em processo em relação a variação da quantidade de peças por kanban - cenário 1.* 70

Figura 4-4 *Valores do percentual de kanbans cheios obtidos para os composições do sistema kanban avaliadas - cenário 1.* 72

Figura 4-5 *Gráfico da média de utilização dos recursos produtivos em relação a variação da quantidade de peças por kanban - cenário 1.* 73

Figura 4-6 *Gráfico da utilização do recurso gargalo em relação a variação da quantidade de peças por kanban - cenário 1.* 74

Figura 4-7 *Gráfico da variação percentual das medidas de desempenho em relação ao mínimo obtido pela aplicação da metodologia - cenário 1.*. 76

Figura 4-8 *Gráfico da variação dos valores do lead-time médio e máximo de produção e de transporte em relação a variação da quantidade de peças por kanban - cenário 2.* 79

Figura 4-9 *Comportamento dos tempo que compõe o lead-time médio de produção em relação a variação da quantidade de peças por kanban - cenário 2.* 80

Figura 4-10 *Gráfico da variação do estoque máximo e médio em processo em relação a variação da quantidade de peças por kanban - cenário 2.* 82

Figura 4-11 *Valores do percentual de kanbans cheios para os composições do sistema kanban avaliadas - cenário 2.* 83

Figura 4-12 *Gráfico da média de utilização dos recursos produtivos em relação a variação da quantidade de peças por kanban - cenário 2.* 84

Figura 4-13 *Gráfico da utilização do recurso gargalo em relação a variação da quantidade de peças por kanban - cenário 2.* 84

Figura 4-14 *Gráfico da variação percentual das medidas de desempenho em relação ao mínimo obtido pela aplicação da metodologia - cenário 2.*. 86

LISTA DE TABELAS

Tabela 4-1 *Tabela dos tempos médios do sistema produtivo.* *61*

Tabela 4-2 *Variabilidade máxima das medidas de desempenho do cenário 1.*..... 64

Tabela 4-3 *Número total de kanbans calculado para cada tamanho de lote avaliado pela aplicação da metodologia - cenário 1.* 65

Tabela 4-4 *Número total de kanbans calculado para cada tamanho de lote avaliado pela aplicação da metodologia - cenário 2.* 77

Tabela 4-5 *Comparação entre as medidas de desempenho da Fábrica JIT com o sistema kanban ajustado com as condições de operação dos dois cenários.* 87

CAPÍTULO I

1. INTRODUÇÃO

1.1. CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA

Em uma sociedade onde os consumidores estão cada vez mais exigindo por qualidade nos produtos e nos serviços, e com os mercados globalizados, dinâmicos e altamente competitivos, há uma crescente preocupação nas empresas não só em manter, mas em incrementar seu desempenho no que diz respeito a qualidade e produtividade. Isto faz com que os empresários se preocupem com maior intensidade no modo de atender a essas exigências oriundas dos clientes, fazendo com que as empresas se tornem rápidas, leves, simples e flexíveis através da busca pela excelência na manufatura.

Devido a estes fatos, as filosofias japonesas de manufatura e administração, especialmente a Filosofia *Just-in-Time* (JIT), têm-se mostrado tão atrativas aos países industrializados e em vias de desenvolvimento. A motivação para a

implementação do JIT resulta da simplicidade dos conceitos envolvidos e dos excelentes resultados passíveis de serem obtidos.

A eficácia do JIT é comprovada por este ser considerado um dos principais fatores que contribuíram ao sucesso da indústria Japonesa. Por exemplo, em um estudo sobre empresas Japonesas que implementaram o JIT, Hall [Hall apud Gupta 89] verificou que estas tiveram: redução de estoque de 15-45%; diminuição no tempo de produção de 20-50%; aumento na produtividade de 50%; redução na rejeição por qualidade de 90%.

Apesar de envolver a empresa como um todo, o conceito básico do JIT é a eliminação total das perdas do sistema produtivo através da estratégia de redução dos estoques. Para atingir este objetivo, só se produz na quantidade e hora necessária para que seja feito o fornecimento para o cliente interno ou externo.

Dentro da Filosofia *Just-in-Time*, uma das técnicas que mais tem sido abordada e implementada nas empresas é o sistema kanban. Confundido muitas vezes com o "Sistema de Produção Toyota", o sucesso prático da utilização do kanban precedeu a maioria dos estudos teóricos publicados na literatura, como reportado por Moden [Moden 84].

O kanban é reconhecido como um sistema simples, que quando aplicado em condições adequadas, substituí com sucesso as tradicionais tarefas de controle do chão de fábrica. O sistema kanban age como a base do JIT, sendo a sua função direcionar a matéria prima somente quando necessário, e transmitir informações do que e quanto deve ser produzido. Entretanto, com a aplicação desta técnica para diferentes situações, nas quais as condições de operação da filosofia JIT não estejam plenamente concretizadas, gerou-se a necessidade de conhecer mais sobre como o sistema kanban se comporta e como pode ser otimizado na planta fabril.

Empresas operando no JIT, como a Toyota, possuem uma grande fatia do mercado onde a variação da previsão da demanda, em percentagem, é pequena. Também possuem funcionários multifuncionais, que podem ser realocados entre

centros de trabalho resolvendo problemas de gargalos temporários. Assim, não necessitam de reajustes rotineiros no sistema kanban. Entretanto muitas empresas utilizando ou pensando em utilizar o kanban não apresentam estas características. Para estas empresas, o ajuste e compreensão do funcionamento do sistema kanbans é essencial, pois com a alteração da demanda mensal é de se esperar que o sistema kanban seja reajustado para esta nova condição.

1.2. OBJETIVO DO TRABALHO

1.2.1. Objetivo Geral

Considerando os aspectos mencionados, tem-se como objetivo geral deste trabalho desenvolver uma metodologia para o ajuste dos parâmetros do sistema kanban que proporcione melhores condições de operação de acordo com as metas do JIT. Objetiva-se também, analisar como os parâmetros do sistema kanban influenciam no comportamento do sistema produtivo, e quais as penalidades ao sistema kanban caso as condições de operação do JIT estejam abaixo do ideal.

1.2.2. Objetivos Específicos

- Estudar as características do sistema kanban e pesquisar como as necessidades do ajuste deste têm sido abordada.
- Desenvolver um modelo para simulação computacional do sistema kanban.
- Desenvolver uma metodologia para o ajuste do sistema kanban.
- Avaliar o comportamento do sistema kanban através de medidas de desempenho do sistema produtivo.
- Analisar a influência da variação da quantidade de peças por kanban no desempenho do sistema produtivo.
- Investigar a influência dos tempos de *setup* (tempo de preparação) dos recursos produtivos no ajuste do sistema kanban.

1.3. IMPORTÂNCIA DO TRABALHO

Na Toyota o sistema kanban foi desenvolvido de forma interativa, em conjunto com outras técnicas que possibilitaram a produção *Just-in-Time*, sendo resultado do esforço da empresa como um todo no sentido de eliminar as perdas do sistema produtivo. O modelo da Toyota não pode ser simplesmente copiado, mas sim compreendido para ser adaptado às situações nas quais se inserem as empresas que pretendem implementar o JIT.

Desta forma, pela compreensão do comportamento do sistema kanban e de como este pode ser ajustado para diferentes condições de operação, pode-se maximizar os benefícios da sua implementação. Conseqüentemente, a implementação das outras técnicas da filosofia JIT é facilitada, crescendo as possibilidades de ganhos com o aumento da produtividade e qualidade da empresa oriundos da implementação do JIT.

1.4. LIMITAÇÕES DO TRABALHO

Não se busca neste trabalho realizar um estudo exaustivo do comportamento do sistema kanban em relação a todas as variáveis do sistema produtivo, restringindo-se o estudo para que os resultados fossem compreensíveis. Também foram feitas algumas simplificações no sistema produtivo analisado em função da utilização da simulação computacional como ferramenta de análise.

1.5. ESTRUTURA DO TRABALHO

Para cumprir com os objetivos propostos, além deste capítulo inicial, organizou-se este trabalho com a estrutura apresentada na figura 1-1.

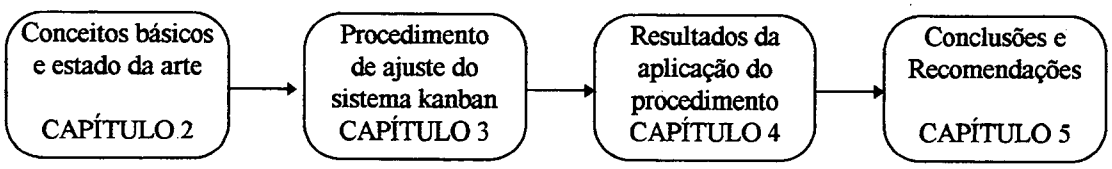


Figura 1-1 *Estrutura do trabalho*

No capítulo 2 são apresentados os conceitos básicos da filosofia JIT e do funcionamento e ajuste do sistema kanban. Aborda-se também, ao longo do capítulo, as técnicas empregadas na simulação computacional e os principais trabalhos da bibliografia que tratam do sistema kanban empregando como ferramenta de análise a modelagem matemática ou a simulação.

Uma vez apresentada a teoria e as ferramentas a serem empregadas no trabalho, no capítulo 3 descreve-se a metodologia desenvolvida para o ajuste do sistema kanban, bem como o processo de modelagem do sistema produtivo proposto com as simplificações inerentes a este processo. No final deste capítulo descreve-se os parâmetros para obtenção de dados estatisticamente representativos através da simulação.

No capitulo 4 é aplicada a metodologia proposta anteriormente para ajustar o sistema kanban do modelo da fábrica JIT. São analisados dois cenários com tempos de setup diferentes para os quais o sistema produtivo é avaliado segundo um grupo de medidas de desempenho. Ao final do capítulo, compara-se o desempenho destes cenários avaliando-se o efeito da redução nos tempos de setup das máquinas.

Finalmente, no capítulo 5, apresentam-se as conclusões obtidas com o desenvolvimento e aplicação da metodologia, bem como as recomendações para trabalhos que venham a complementar este estudo.

CAPÍTULO II

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo serão discutidos os principais conceitos e teorias fundamentais para o desenvolvimento do trabalho, assim como as principais pesquisas e aplicações relacionadas as mesmas, encontradas na bibliografia.

2.1 A FILOSOFIA *JUST-IN-TIME* (JIT)

Alguns autores nomeiam e explicam a filosofia JIT sob diferentes termos, como por exemplo: Fabricação Classe Universal [Schonberger 88], Excelência na Manufatura [Hall 88] ou Fabricação Superior [Harmon 91]. Ao ser aplicada pelas empresas, atribuem-lhe nomes próprios como Manufatura de Fluxo Contínuo (IBM) ou Sistema de Inventario Mínimo (General Motors), não existindo desta forma uma definição única para o JIT.

Apesar do JIT ser uma filosofia completa, que envolve toda a empresa como organização e exige a interação de todos os setores (financeiro, produção, vendas,

etc), este trabalho centrar-se-á nos aspectos diretamente relacionados com o sistema de produção.

Sob o ponto de vista dos aspectos produtivos pode-se dizer que a filosofia JIT tem como objetivo fundamental, melhorar continuamente a produtividade e qualidade dos produtos e serviços, procurando flexibilidade no atendimento da demanda, simplicidade nos processos e eliminação de todas as formas de desperdício que não agreguem valor às atividades desenvolvidas.

Para realizar o melhoramento contínuo da produção e a eliminação dos desperdícios, o sistema JIT tem como estratégia de produção a redução dos estoques a níveis mínimos através da produção no momento certo e na quantidade certa. Com a redução dos estoques, reduzem-se os seus efeitos amortecedores, evidenciando os problemas na produção e criando a necessidade da eliminação dos mesmos para que a produção possa fluir através do a sistema produtivo. Esta meta é operacionalizada através das ferramentas JIT para o chão de fábrica.

2.1.1 Ferramentas do JIT

Entende-se como ferramentas as disciplinas, métodos ou técnicas que desenvolvam uma determinada área dentro da empresa. Um aspecto importante no modelo JIT são as ferramentas do chão-de-fábrica que dão suporte à esta filosofia, como a produção puxada, o nivelamento da produção, a manufatura celular, a troca rápida de ferramentas e a polivalência da mão-de-obra.

2.1.1.1 Produção Puxada

A idéia de puxar a produção, em contraponto ao sistema convencional de empurrar (ou prever) a fabricação de lotes pela empresa, tem por objetivo utilizar de maneira mais racional possível os recursos de manufatura disponíveis, de tal forma que o fluxo produtivo, e não as capacidades individuais dos recursos, seja maximizado.

A produção puxada estabelece que cada elo da cadeia produtiva só deve iniciar a produção de determinado lote quando houver efetivo consumo deste lote pelo processo "cliente" da cadeia produtiva. Neste sentido, olhando apenas internamente na empresa, a expedição é o setor que dá partida ao ciclo produtivo, e como ela está mais próxima dos consumidores, as variações da demanda são sentidas e respondidas de forma mais imediata.

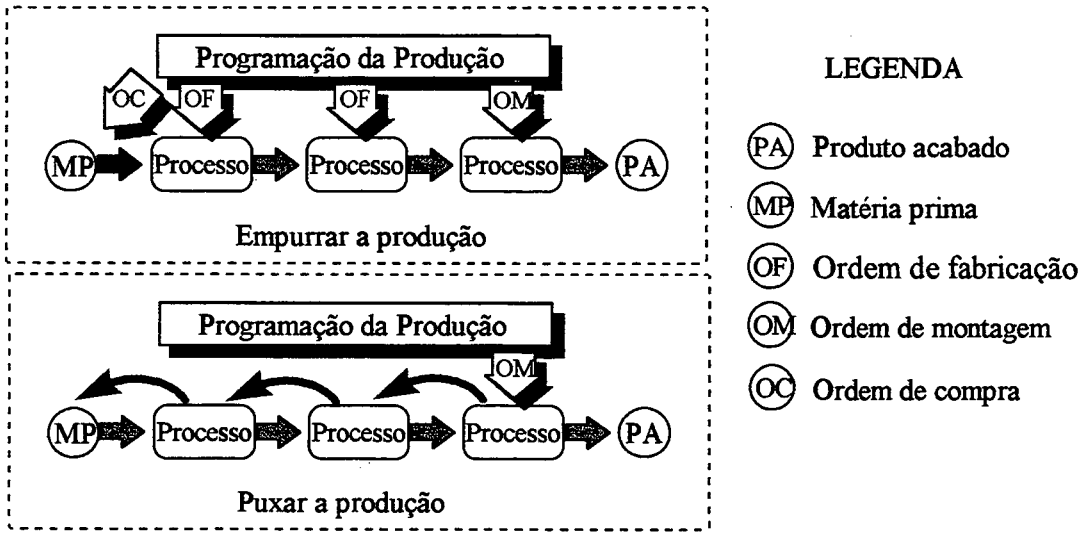


Figura 2-1 *Lógica de empurrar e puxar a produção.*

2.1.1.2 Nivelamento da Produção

O nivelamento da produção consiste em substituir a fabricação de grandes lotes, característica dos sistemas convencionais, pela fabricação de pequenos lotes variados, acompanhando a demanda, flexibilizando a produção e permitindo o atendimento rápido dos clientes com inventários reduzidos.

Com a produção nivelada, o único documento necessário na programação da produção é o programa de montagem final, que pode ser flexibilizado de acordo com a demanda. Os demais setores da empresa trabalhariam com um sistema de puxar a produção a partir da demanda do produto final.

2.1.1.3 Manufatura Celular

A manufatura celular, ou produção focalizada, tem por objetivo reorganizar a fábrica em pequenas unidades produtivas mais simples e ágeis, onde o fluxo produtivo, e não as operações individuais, sirvam de base para desenvolver o lay-out. A idéia geral, consiste em transformar processos intermitentes em um conjunto de pequenos processos contínuos.

A manufatura celular, quando implantada dentro dos princípios da filosofia JIT, independentemente do seu grau de automação, trás consigo vantagens incontestáveis que levam a drástica redução dos tempos de processamento e melhora da qualidade.

2.1.1.4 Troca Rápida de Ferramenta

Para ser possível a produção em pequenos lotes é necessário a redução do tempo de setup das máquinas. A adoção da troca rápida de ferramentas é a maneira mais eficaz na redução do tempo de setup. No JIT esta tarefa é executada através de metodologias, como por exemplo a descrita por Shingo [Shingo 96a]. Neste trabalho estas metodologias não serão abordadas, sendo entretanto avaliado o efeito da redução do setup no sistema produtivo.

2.1.1.5 Polivalência da Mão-de-obra

No sistema JIT o lay-out fabril é reorganizado com a formação de células de produção aproximando as máquinas, reduzindo os custos com o transporte e permitindo que um mesmo trabalhador opere mais de uma máquina através da autonomação. A polivalência dos trabalhadores os leva a maiores níveis de satisfação e motivação, e realça suas habilidades e criatividade através da aplicação de soluções já utilizadas a diferentes situações. Esta ferramenta não será estudada no presente trabalho, sendo aqui apresentada para o melhor entendimento da filosofia JIT.

2.2 PLANEJAMENTO E CONTROLE DA PRODUÇÃO NO AMBIENTE JIT

Os sistemas de Planejamento e Controle da Produção (PCP) ocupam-se do fluxo de informações entre todas as atividades, da aquisição de matéria prima a entrega do produto acabado. Estes sistemas são destinados a funcionar como interface para o gerenciamento de várias atividades da empresa.

O PCP compreende funções de longo, médio e curto prazo. A programação da produção é a primeira atividade dentro do nível operacional de curto prazo. Esta atividade é desenvolvida a partir do Plano Mestre de Produção (PMP), como apresentado na figura 2-2.

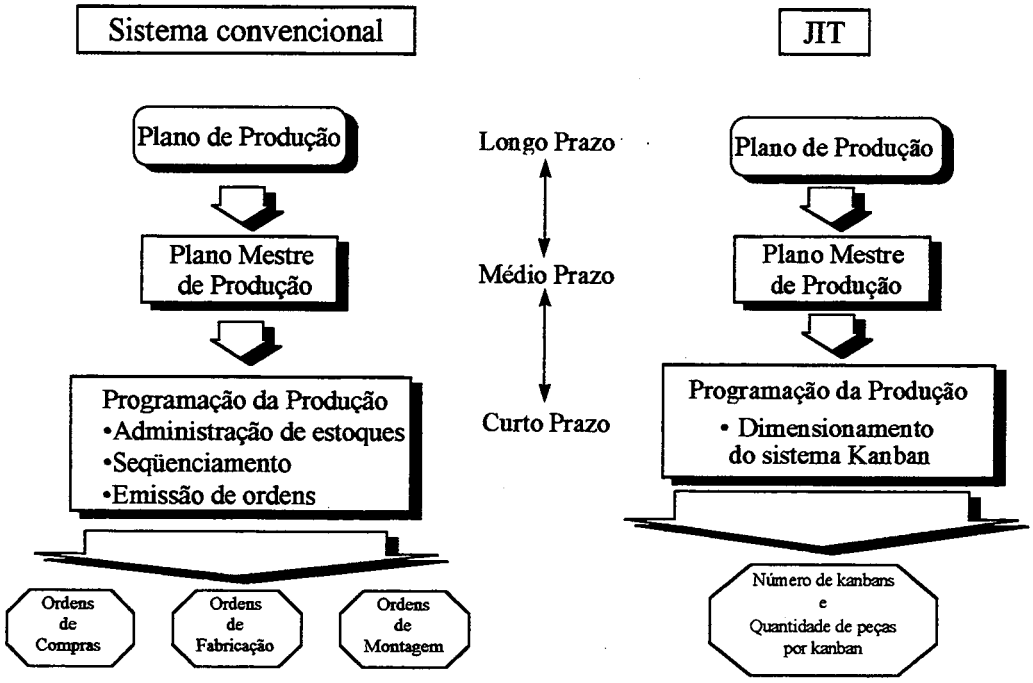


Figura 2-2 *Hierarquia das funções do PCP do sistema convencional de produção e do JIT.*

A figura 2-2 mostra a hierarquia das funções do PCP para o sistema de *empurrar* e *puxar* a produção. Os dois sistemas são semelhantes, apresentando diferenças na função de curto prazo, pois operacionalizam a produção de forma diferente.

No sistema convencional de produção (*produção empurrada*), a partir da previsão de demanda pelo Plano Mestre de Produção (PMP), é elaborado um programa de produção completo, da compra da matéria-prima à montagem do produto acabado. Desta forma, a programação da produção é responsável pelo início das atividades produtivas, sendo operacionalizada através de ordens de compra, fabricação e montagem. Para o próximo período de programação, em função dos estoques remanescentes, programam-se novas ordens para atender a um novo PMP. Tendo sido emitidas as ordens de compra, fabricação e montagem, estas são seqüenciadas e enviadas para os setores responsáveis de forma a atender aos prazos estipulados pelo PMP.

Já no sistema de *puxar* a produção, só se produz quando o cliente (interno ou externo) solicita a produção de determinado item. A medida em que o cliente de um processo necessita de itens, ele recorre aos estoques do fornecedor, acionando diretamente este processo para que os itens consumidos sejam fabricados e repostos aos estoques. Esta é a ótica da filosofia *Just-in-Time*, normalmente operacionalizada pelo sistema de programação via kanbans.

Segundo Monden [Monden 84], o planejamento da produção no ambiente JIT envolve duas fases: *a programação mensal*, adaptando a produção mensal às variações da demanda mensal; e *a programação diária* da produção, que adapta a produção diária as variações de demanda diária durante um mês.

A adaptação mensal é obtida com a preparação de um Plano Mestre de Produção, a partir do qual é feita a estimava do nível médio diário de produção em cada processo da fábrica. Através desta estimativa, as variáveis de controle do sistema são ajustadas. Já a adaptação diária é realizada através do sistema de puxar a produção, como por exemplo com a utilização do sistema kanban, que será descrito no próximo item.

2.3 FLUXO E CONTROLE DA PRODUÇÃO ATRAVÉS DO SISTEMA KANBAN

Tendo sido estabelecida a programação mensal e ajustado o sistema para operar de acordo com a demanda prevista, a programação diária é feita pela adaptação diária à demanda de produtos usando um sistema de puxar seqüencialmente a produção, como o sistema kanban.

O kanban serve como uma ordem de produção, que administra o processo para que haja a produção no tempo exato. Existem vários tipos de sinais como cartões, painéis de visualização, luzes e sistemas eletrônicos, que podem ser usados como sinais kanban. O único fato que separa o verdadeiro sistema kanban de outros sistemas de cartão, como as ordens de produção usadas na maioria das empresas, é a incorporação do sistema de produção *puxado,* já que somente após o consumo das peças na linha de montagem é gerada autorização de fabricação de novas peças.

Diz-se que o sistema kanban foi inspirado no funcionamento dos supermercados. As características em comuns dos dois sistemas são: os consumidores escolhem as mercadorias diretamente, no momento e nas quantidades necessárias; os próprios consumidores levam a mercadoria ao caixa, diminuindo o trabalho dos empregados; ao invés de utilizar o sistema de reabastecimento estimado, é reposto somente o que foi vendido, reduzindo desta forma os estoques.

O funcionamento do sistema kanban é baseado principalmente na terceira característica, ou seja, a de só repor o estoque do que foi consumido. Dependendo da finalidade, o kanban pode apresentar-se de diferentes formas, todas segundo o mesmo princípio de funcionamento.

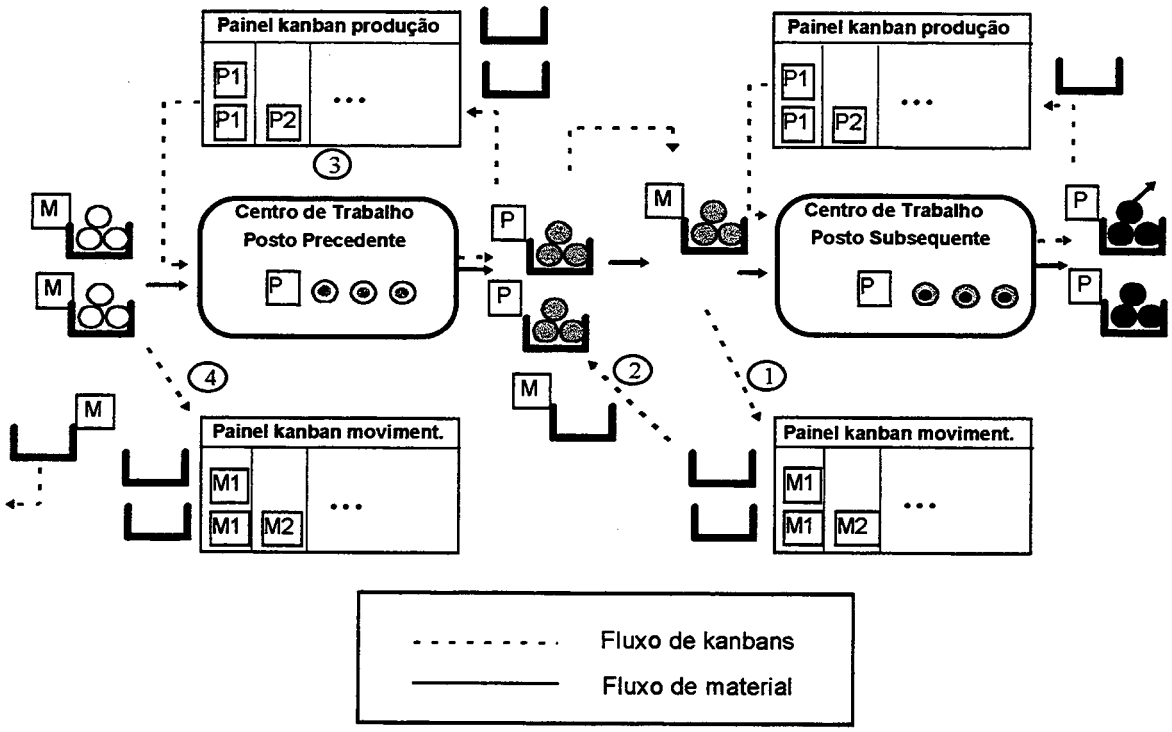


Figura 2-3 *Fluxo de informação para o controle de materiais do sistema de puxar*

O kanban de produção tem a função de dar inicio à produção de um lote de peças de determinado tipo, circulando entre os postos de armazenagem de dois centros de produção contíguos. Se os processos forem próximos, não há a necessidade de um sistema de transporte para realizar o fluxo de material. Neste caso, o estoque de produtos acabados de um processo funciona como estoque de matéria prima para o processo subsequente, chamado de sistema kanban de um cartão.

Quando os processos são distantes, necessita-se do emprego de um sistema transportador para realizar o fluxo de material pela planta fabril. O controle das peças a serem transportadas é realizado pelo kanban de movimentação. A sua função é autorizar a movimentação de material pela fábrica, circulando entre o centro de produção e o seu posto de armazenagem junto ao consumidor. Este é o sistema kanban formada por dois cartões esquematizado na figura 2-3.

Geralmente, as empresas implementam o sistema kanban internamente, expandindo para toda a rede de produção numa fase seguinte. Para operacionalizar

o JIT externamente é empregado o kanban de fornecedor, que possui instruções para o fornecedor entregar os itens, detalhando a freqüência, o ciclo de entrega, e informações do fornecedor. Este tipo de kanban não será tratado no presente trabalho.

O fluxo de materiais gerenciado pelos kanbans produção e movimentação, apresentado na figura 2-3, se procede da seguinte forma [Shingo 96a]:

1. Quando as peças são consumidas no supermercado de matéria prima em um centro de trabalho, um kanban de movimentação é removido e colocado no painel de kanban movimentação, indicando a necessidade de reposição deste item.

2. Um trabalhador ou o sistema transportador leva esse kanban de movimentação ao processo precedente para apanhar itens processados. Ele retira um kanban de produção do contenedor e coloca-o no quadro de controle dos kanbans de produção. O kanban de movimentação é colocado no contenedor e esse é transportado para o supermercado de matéria prima do processo que o requisitou. Esta ação é executada quando um número pré-determinado de kanbans de movimentação estiver acumulado, ou em períodos regulares.

3. O kanban de produção retirado do contenedor serve de etiqueta de instruções para que se execute o processamento dos itens semi-processados, alimentados pelo processo precedente. O centro de trabalho produz as peças pela seqüência indicada pelas prioridades do quadro de kanbans de produção.

4. Conforme vão sendo consumidas as peças do supermercado de matéria prima do centro de trabalho que corresponde ao processo subseqüente, os kanbans de movimentação vão se acumulando no quadro de kanbans de movimentação deste processo.

Como resultado, um reação em cadeia de trocas de kanban de movimentação e produção desenvolve-se no sentido inverso da seqüência de processamento. Através deste sistema, uma mudança nos planos de produção em função da variação da demanda só precisa ser indicada no final da linha de montagem, e através do sistema kanban, a informação é conduzida para o resto do sistema produtivo.

2.4 O AJUSTE DO SISTEMA KANBAN

O ajuste adequado do sistema kanban é necessário para o atendimento da meta JIT de redução de estoques, sem que entretanto seja interrompido o fluxo produtivo pela falta de material nos recursos produtivos. Outro aspecto importante do sistema kanban na operacionalização do JIT é que este contribui para o enfoque da qualidade total sob dois aspectos [Shingo 96a]:

1. Os kanbans evidenciam situações anormais, quando eles são retirados por falhas nas máquinas e defeitos nos produtos.

2. Uma diminuição gradual no número de kanbans leva a redução no estoque, diminuindo o efeito amortecedor destes contra as instabilidades na produção. Em função disto, destacam-se os processos com capacidades subtilizadas e processos geradores de anormalidades como quebras, flutuação dos tempos de operação, altos setup, etc. Assim, a descoberta dos principais pontos de melhoria ficam mais simples. A eficiência total pode ser aumentada, concentrando-se nos pontos mais fracos do sistema.

Desta forma, o dimensionamento do sistema kanban é um fator crucial para operação eficiente do JIT, sendo um tópico de grande interesse dos pesquisadores, principalmente a partir da década de 70 com a divulgação da Filosofia JIT pela Toyota. Golhar e Stamm [Golhar 91] reportam através de uma extensa revisão bibliográfica, vários estudos realizados analisando a Filosofia JIT. Dentre os aspectos de maior interesse, o sistema kanban tem sido um dos mais estudados pelos pesquisadores.

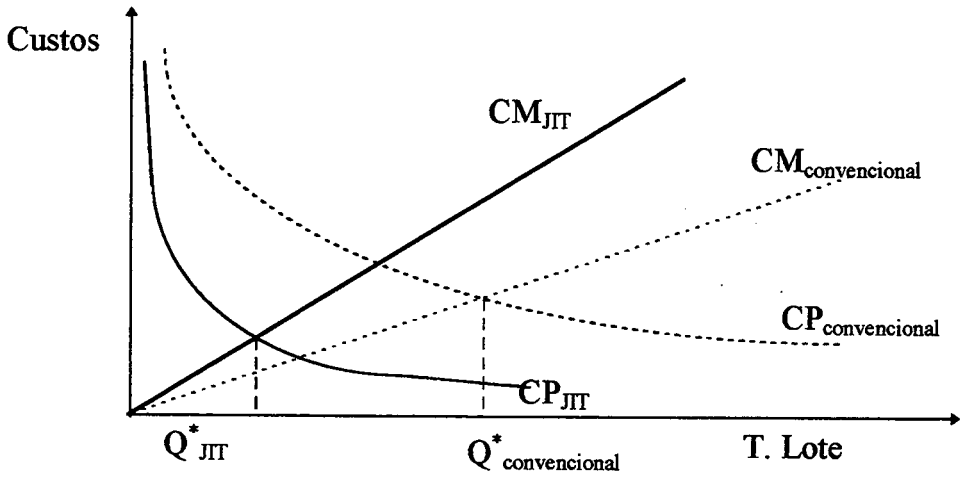
O ajuste adequando do sistema kanban compreende o dimensionamento do tamanho do lote de produção (quantidade de peças por kanban) e o número de kanbans circulando no sistema produtivo. Estes dois parâmetros determinam o estoque máximo em cada processo do sistema produtivo. Desta forma, no gerenciamento do sistema kanban, pode-se influir no nível dos estoques em cada estágio através de diferentes políticas: redução do número de kanbans; diminuição do tamanho do lote de produção (quantidade de peças por kanban); aumento no tamanho do lote, mas com a redução do número de kanbans ou vice versa.

O tamanho do lote de produção está relacionado diretamente com o tempo de setup dos recursos produtivos. Por isto, através do emprego de técnicas de troca rápida de ferramenta, busca-se reduzir e se possível, eliminar o tempo de preparação para produção do lote (kanban). O enfoque da Filosofia JIT busca operar com lotes cada vez menores, flexibilizando o programa de produção, da seguinte forma:

1. Por um lado, no JIT dá-se ênfase na necessidade de se reduzir os custos de preparação. Seja o setup das máquinas através do emprego de troca rápidas de ferramentas, seja o custo da ordem de compra através da melhora no relacionamento com os fornecedores.

2. Por outro lado, têm-se verificado que associados aos custos convencionas de manutenção de estoques, existem uma gama muito importante de custos, ditos da "má qualidade", que estão diretamente relacionados com a quantidade de estoques disponíveis no sistema produtivo. A motivação da mão-de-obra que se perde ao produzir-se para estocar, ao invés de diretamente para um cliente (interno ou externo), a não identificação imediata dos problemas que ficam encobertos pelos estoques, a falta de ritmo entre setores produtivos que se isolam com os estoques em processo, entre outros.

Na figura 2-4 pode-se ver o que ocorre com o tamanho do lote econômico quando estamos operando um sistema convencional de produção e um sistema baseado na lógica da Filosofia JIT. Como no JIT os custos de preparação são reduzidos, e por outro lado, os custos de manutenção dos estoques são incrementados rapidamente com qualquer volume adicional de estoques, o lote econômico ideal do JIT situa-se perto da unidade.



CM - custo de manutenção dos estoques
CP - custo de preparação
Q* - tamanho do lote econômico

Figura 2-4 *Comparação entre os custos envolvidos na determinação do tamanho do lote no sistema convencional de produção e no JIT.*

Existem várias fórmulas para o cálculo de lotes econômicos para as mais diversas situações. Basta desenvolver uma equação de custos representativa da situação e pesquisar seu ponto de mínimo em relação à quantidade ou à periodicidade de reposição. Entretanto, deve-se falar em "faixa econômica", ao invés de lote econômico, dentro da qual os custos totais serão menores, e, ao determinar-se um valor para o lote econômico, este servirá apenas como um indicativo do valor em torno do qual se dará a reposição.

Quanto a determinação do número de kanbans, Monden [Monden 84] foi o primeiro pesquisador a desenvolver uma equação (2-1) para a determinação deste parâmetro, utilizada pela Toyota. Nesta equação, o número de kanbans é função da

demanda diária prevista, do *lead-time*, do nível de segurança do estoque e da capacidade do contenedor.

$$n_{kanban} = \left[D \cdot LT_{max}\right] * C_s \qquad \textbf{(2-1)}$$

onde:

n_{kanban} = número de kanbans.

D = demanda média diária expressa em kanbans.

C_s = coeficiente de segurança.

LT_{max} = é o *lead-time* máximo para cada produto. Para o dimensionamento do kanban de produção utiliza-se o *lead-time* de produção e para do kanban de transporte emprega-se o *lead-time* de transporte.

Esta equação dimensiona o número de kanbans estaticamente, sem levar em conta que o *lead-time* é dependente do número de kanbans e do tamanho do lote de produção, ou seja, da quantidade de peças por kanban. Nem considera que um grande número de fatores influencia o patamar ótimo de operação do sistema kanban, como relatado por vários estudos da bibliografia [Bard 91], [Co 94], [Furukawa 93], [Rees 87]. Entre estes a variabilidade dos tempos de processamento, demanda, tempo de setup, freqüência de quebras de maquinário e a existência de problemas de qualidade com os produtos.

Além disto, na prática a relação entre o número de kanbans de produção e movimentação interfere no dimensionamento do sistema kanban. O número de kanbans de produção do estoque do processo precedente tem que ser suficiente para suprir as necessidades do sistema transportador com os kanbans de movimentação do estoque subsequente. Caso a quantidade de kanbans de produção cheios seja menor que a quantidade de kanbans de movimentação que está no sistema transportador, parte da demanda não será satisfeita. Neste caso, o número de kanbans de produção deve ser aumentado.

A partir da equação desenvolvida por Monden, vários estudos foram realizados na determinação do número ótimo de kanbans em um sistema produtivo,

bem como a determinação dos fatores que influenciam, e da forma como influenciam, a performance do sistema kanban. Nestes estudos são empregadas diferentes abordagens, sendo que recentemente a simulação tem sido uma das mais utilizadas, como reportado no final deste capítulo.

2.5 A SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

A simulação é uma ferramenta de análise, podendo ser definida segundo Pegden et al. [Pegden 95] como "o processo de projeto de um modelo do sistema real e na condução de experimentos com este modelo com o propósito de entender e/ou avaliar várias estratégias de operação do sistema". Considera-se que a simulação inclua tanto a construção do modelo como o uso experimental do modelo para a análise do problema. Assim pode-se encarar a simulação como sendo uma metodologia que visa: descrever o comportamento do sistema, inferir características de operação do sistema real resultando na construção de teorias ou hipóteses que descrevem o comportamento observado e utilizar o modelo para prever o comportamento futuro, ou seja, os efeitos produzidos por mudanças nos métodos de operação do sistema.

A simulação apresenta uma série de vantagens em relação aos modelos analíticos quando utilizada como ferramenta de análise, pois os conceitos envolvidos na simulação são de fácil compreensão, facilitando a discussão do modelo com pessoas não envolvidas no processo de simulação. Além disto, a simulação é mais fácil de ser comparada com o sistema real por requerer menos simplificações.

Segundo Pegden et al. [Pegden 95], alguns dos benefícios da utilização da simulação, são:

- Novas políticas, procedimentos de operação, regras de decisão, estruturas organizacionais, fluxo de informação, poderem ser exploradas sem interrupção das operações.

- Conhecimento sobre as variáveis que são mais importantes para a performance do sistema e da forma como estas interagem.

- Gargalos no fluxo de material podem ser identificados.

- Através da animação do modelo pode-se obter o consenso para tomada de decisão.

Entretanto, existem algumas desvantagens na utilização da simulação. Inicialmente é necessário treinamento especializado, pois a qualidade da análise depende grandemente das competência e habilidade do modelador. Os resultados da simulação podem ser de difícil interpretação, pois o modelo tenta capturar a aleatoriedade do sistema. E finalmente, o fato da análise da simulação consumir tempo e recursos.

O propósito da simulação é ajudar na tomada de decisão para a solução do problema. Porém, segundo Pegden et al. [Pegden 95], para se obter sucesso na simulação alguns passos devem ser seguidos.

i) Definição do problema - definição clara dos objetivos do estudo de forma a se conhecer os propósitos da simulação.

ii) Planejamento do projeto - definição dos recursos a serem utilizados.

iii)Definição do sistema - determinação dos limites e restrições utilizadas na definição do problema e investigação de como o sistema opera.

iv)Formulação conceitual do modelo - desenvolvimento de um modelo preliminar descrevendo os componentes, variáveis e a lógica que constitui o sistema.

v) Projeto experimental preliminar - seleção dos parâmetros de eficiência a serem utilizados, fatores a serem variados, nível de investigação, ou seja, quais dados devem ser utilizados do sistema e em qual forma e extensão.

vi)Preparação dos dados de entrada - identificação e coleta dos dados necessários para o modelo.

vii)Modelagem - formulação do modelo na linguagem de simulação apropriada.

viii)Verificação e validação - confirmação de que o modelo opera na forma que o analista planejou e que os resultados do modelo são confiáveis e representativos em relação ao sistema real.

ix)Projeto final do experimento - projeta-se o experimento de forma a produzir as informação desejadas e determinação dos testes a serem executados.

x) Experimentação - execução da simulação para gerar os dados e realização da análise de sensibilidade.

xi)Análise e interpretação - obter inferências sobre os resultados.

xii)Implementação e documentação - anotação dos resultados e documentação do modelo utilizado.

As linguagens utilizadas para simulação podem ter diferentes tipos de abordagem em relação a mudanças no estado do sistema com o avanço do tempo. As três principais abordagens são por *evento*, *atividade* ou *processo*, e praticamente todas as linguagens são baseadas em uma destas abordagens ou na combinação destas. A abordagem utilizada influencia significativamente na forma como o sistema é modelado.

Na abordagem por *evento*, o sistema é modelado através dos eventos que ocorrem. Na modelagem do sistema deve-se definir os eventos e a lógica associada com a ocorrência destes. Na abordagem por *atividade*, o começo, fim e duração de uma operação são modelados juntos como partes de uma atividade. O modelador deve definir e codificar a lógica necessária para o começo e fim de cada atividade.

Nos modelos baseados por *processo*, o sistema é caracterizado por uma seqüência de eventos e atividades que um constituinte particular do sistema (uma entidade) segue.

2.6 ESTUDOS DA BIBLIOGRAFIA

Ao longo da revisão bibliográfica constatou-se que a maioria das pesquisas realizadas são focadas na descrição geral do sistema kanban, na sua comparação com o sistema convencional de produção, na identificação dos principais fatores críticos que afetam o JIT e o sistema kanban, bem como na determinação do número de kanbans circulantes e quantidade de peças por kanban. Na literatura estes estudos têm sido realizados, em grande parte dos casos, utilizando-se da modelagem matemática e/ou da simulação computacional. Como nesta dissertação será empregada a modelagem através da simulação, será dada mais ênfase a estes estudos.

2.6.1 Estudos Envolvendo a Modelagem Matemática

Na modelagem matemática busca-se desenvolver um modelo matemático que represente o sistema de produção em estudo, sendo empregado para otimizar certos parâmetros de avaliação, como por exemplo, o custo médio de armazenagem do estoque ou a quantidade total produzida por ciclo. Esta abordagem tem sido utilizada principalmente para o estudo dos fatores que influenciam a performance da Filosofia JIT e do sistema kanban.

Bard e Golany [Bard 91] e também Wang e Wang [Wang 90] aplicaram a modelagem matemática para a determinação do número de kanbans de um sistema de produção com múltiplos estágios, através da minimização dos custos de armazenagem, da escassez de material e do tempo de setup. O modelo foi formulado através de um programa linear integral misto, sendo resolvido com as técnicas usuais. Os resultados foram comparados com os que seriam obtidos utilizando a equação 2-1.

Li e Co [Li 91] reportam o problema da determinação do número de kanbans em cada estágio da produção. Para tanto desenvolveram uma formulação matemática que descreve o funcionamento do sistema kanban, tendo como solução do problema a determinação do número ótimo de kanbans. Porém não apresentaram resultados conclusivos no trabalho.

Outro autor a utilizar a modelagem matemática é Mascolo [Mascolo 96], que propôs um método analítico para avaliar a performance de sistemas de kanban de um cartão, onde a demanda estava relacionada com um determinado processo.

Já Fukukawa e Hong [Furukawa 93] desenvolveram um modelo para a determinação do número de kanbans necessários levando em conta os seguintes fatores: flutuação da demanda durante o horizonte de planejamento, estoque em processo, carga máquina, capacidade de cada processo, capacidade de subcontratados, tamanho do contenedor, tempo ocioso não agendado e horas extras. Para o desenvolvimento do modelo, uma formulação matemática utilizando programação com objetivos múltiplos foi apresentada.

Um dos poucos trabalho da bibliografia a tratar sobre a capacidade do contenedor, foi o desenvolvido por Yanagawa e Miyazaki [Yanagawa 94]. O objetivo deste trabalho foi determinar o plano de operação ótimo para o sistema kanban operando com *lead-time* variável, através da análise dos resultados de várias simulações de um modelo matemático. O plano de operação ótimo consistiu na determinação da capacidade do contenedor e do número de kanbans que minimizaram o custo total de operação. Os autores consideraram o custo total como sendo constituído do custo do estoque e do custo de movimentação do kanban.

Foram testados vários valores para a capacidade do contenedor, determinando o número de kanbans de forma a satisfazer o nível de segurança em função da demanda e do *lead-time* previamente calculado. Como resultado obtiveram um gráfico da quantidade de peças por contenedor versus o custo total.

A partir deste gráfico os autores determinaram a capacidade ótima do contenedor, recomendando a utilização de uma capacidade um pouco maior que a estimada em situações práticas.

Já Phillipoom et al. [Philipoom 90] desenvolveram um modelo para a determinação do tamanho do lote apropriado para ser utilizado em conjunto com o kanban de sinalização no chão de fábrica JIT. Como resultado, dois modelos de programação matemática integrais para a determinação do tamanho do lote do kanban de sinalização foram desenvolvidos. Uma das versões explora uma função objetivo que minimiza o estoque, enquanto que a outra minimiza o custo total. A implicação dos resultados obtidos foi a de ser prudente considerar os custos dos estoques e do setup ao invés de simplesmente procurar reduzir o estoque ao nível mínimo na determinação do tamanho do lote de produção.

Entretanto, Madu e Kuei apud Aytug et al.. [Aytug 96] reportaram que muitas das formulações matemáticas complexas só são praticáveis para pequenas aplicações. Além disto, a utilização de parâmetros determinísticos, para os tempos de processamento e demanda, por exemplo, podem levar a resultados não realísticos gerando soluções sem utilidade na prática. Em contrapartida, a simulação supera estas limitações, através da inclusão de condições do chão de fábrica mais realistas.

2.6.2 Estudos com Simulação

Nos anos 80 surgiu a primeira linguagem de alto nível, baseada em eventos discretos, que estava em desenvolvimento desde o início dos anos 60. Atualmente existe um número crescente de novas linguagens que tiveram o seu desenvolvimento nos últimos 20 anos. Nestes anos, a simulação saiu dos laboratórios de pesquisa operacional para se tornar uma técnica e metodologia que está sendo largamente utilizada. Os principais estudos da Filosofia JIT e mais especificamente do sistema kanban que utilizam a simulação como ferramenta serão descritos neste tópico.

Inicialmente, serão descritos alguns estudos que se propõe a calcular o número ótimo de kanbans e o gerenciamento do sistema de puxar a produção utilizando a simulação. Nestes estudos, o número de kanbans é calculado a partir de metodologias propostas pelos autores.

Rees et al. [Rees 87] desenvolveram uma metodologia para ajuste dinâmico do número de kanbans para ser aplicada ao chão de fábrica. O princípio básico utilizado está no emprego da equação 2-1. Através desta equação, o número de kanbans foi ajustado periodicamente em cada centro de trabalho baseado na previsão da demanda para o próximo mês e *lead-time* do mês anterior que foram os dados de entrada para calcular o número de kanbans.

Para a determinação do número de kanbans, Rees et al. [Rees 87] levaram em conta dois custos diretos da operação do kanban: o custo de estocagem e o custo da escassez de matéria prima. Com a função densidade gerada a partir dos valores obtidos do *lead-time* em combinação com a demanda prevista, e levando em conta os dois custos supracitados da operacionalização do sistema kanban, o número de kanbans foi determinado.

Entretanto, como normalmente o custo da escassez de matéria prima é muito maior do que o custo de armazenagem, foi proposta uma abordagem simplificada de cálculo do número mínimo de kanbans de forma a não faltar matéria prima (custo de escassez zero), minimizando-se o custo de armazenagem. Neste caso não houve a necessidade de gerar a função densidade do *lead-time*. Apresenta-se a seguir a descrição desta metodologia simplificada de minimização dos estoques, constituída de 7 passos.

Passo 0 - inicialização

Se recém foi implementado o kanban no chão de fábrica ou foram realizadas mudanças significativas, perturbando as condições de operação, permite-se que neste passo os efeitos transientes desapareçam.

Passo 1 - período de cálculo 1

O propósito deste período é estimar a autocorrelação dos *lead-time* de forma a obter dados estatisticamente independentes no passo 2. Este passo é necessário pois foi comprovado por experimentação que o valores do *lead-time* são fortemente correlacionados.

Passo 2 - período de cálculo 2

Neste passo são estimados os valores dos *lead-time* para cada item em cada centro de trabalho, aplicando os resultados do passo 1 para coleta de dados não correlacionados para que estes sejam estatisticamente independentes. Foi utilizada uma defasagem ("lag") na obtenção dos dados que mantivessem a autocorrelação abaixo de 0,05. Foi utilizado o valor máximo dentre os coletados para os passos seguintes.

Passo 3 - Previsão da demanda

Utilizando-se do Plano Mestre de Produção para bens acabados da empresa, faz-se a previsão da demanda de cada item dos centros de trabalho.

Passo 4 - Determinação do número de kanbans

Estimativa do número de kanbans para cada item através da equação 2-2, minimizando o custo de armazenagem.

$$n_{kanban} = \left[D \cdot LT_{max}\right] \qquad (2\text{-}2)$$

onde:

D - demanda prevista

LT_{max} - *lead-time* máximo

É interessante observar que foi omitido o coeficiente de segurança nesta equação. Apesar de não comentar este fato, presume-se que os autores estivessem interessados em estimar o patamar mínimo ao qual o sistema kanban poderia ser ajustado, admitindo a possibilidade de escassez, caso o

lead-time máximo do período seguinte fosse maior que o do período anterior. Neste caso, as quantidades de kanban seriam reajustadas no período seguinte, como apresentado no gráfico no qual o autor exemplifica a aplicação desta metodologia a um sistema produtivo.

Passo 5 - Passo de ação

Os valores calculados para o número de kanbans no passo anterior são implementados.

Passo 6 - Período de estabilização e retorno

O propósito deste passo é permitir que os centros de trabalho tenham tempo suficiente para estabilizarem, depois da implementação do passo 5, antes de retornar ao passo 1, repetindo a metodologia para o período seguinte. Ou seja, permite-se que o sistema entre em regime permanente antes de continuar o processo. Note que se o número de kanbans for aumentado, estes devem ser produzidos pelo processo anterior.

Para o teste e desenvolvimento desta metodologia, foi simulado um sistema de produção hipotético utilizando-se da linguagem Q-GERT. Como resultado, foi apresentado um exemplo que explora como a metodologia ajusta o número de kanbans quando este for dimensionado errado. O número errado de kanbans pode estar circulando em um centro de trabalho em função de uma previsão de demanda errada, ou pela falta de conhecimento de como inicializar o sistema kanban. Este tipo de problema pode acontecer quando se inicializa o sistema produtivo ou quando ocorrem mudanças no chão de fábrica, como por exemplo a introdução de um novo produto ou mudanças no lay-out.

No exemplo foi mostrado que o chão de fábrica pode se ajustar rapidamente ao número incorreto de kanbans. Assim, o supervisor e a gerência não precisariam se preocupar em ajustar o número de kanbans exatos na primeira estimativa para o sistema, pois a metodologia ajustaria o número de kanbans ao nível apropriado.

Os autores empregaram a simulação neste trabalho somente para validar a metodologia proposta, podendo os resultados obtidos serem aplicados a um sistema de produção real sem o emprego da simulação. Neste caso os valores do *lead-time* seriam coletados do sistema real e tratados estatisticamente da mesma forma como foi realizado no estudo com a simulação.

Outro trabalho a propor uma forma de gerenciamento dos estoques foi o desenvolvido por Chuaddhury e Whinston [Chuaddhury 90]. Os autores desenvolveram um mecanismo de controle da produção descentralizado e adaptativo baseado no sistema kanban, para tomada de decisão on-line em um sistema de manufatura flexível. Neste sistema, a liberação dos estoques foi feita levando-se em conta o nível atual de congestionamento e escassez de matéria prima nos vários pontos do sistema. Este mecanismo foi constituído de "máquinas de aprendizagem estocásticas" denominadas de agentes adaptativos e testado através da simulação do sistema de produção.

A análise deste mecanismo foi inicialmente realizada para o caso de uma máquina operando em um ambiente randômico. Foram gerados resultados analíticos que estabeleceram as propriedades desejadas para o melhoramento do comportamento dos agentes adaptativos. A seguir a metodologia foi generalizada para o caso de N máquinas, cada uma operando independente e ignorando a existência das outras. Todas as máquinas seguiram o mesmo algoritmo adaptativo, recebendo o mesmo tipo de retorno. Foi mostrado através deste experimento que mesmo nestas circunstancias gerais foi possível aumentar o desempenho do sistema.

A implicação deste tipo de algoritmo foi que políticas simples de controle descentralizados em um ambiente complexo podem levar ao comportamento desejado pelo grupo de máquinas. Entretanto, como descrito pelo autor, ainda existem fatores críticos a serem investigados antes que esta forma de controle possa ser implementada na prática com sucesso, sendo o propósito do trabalho estabelecer a viabilidade teórica e experimental desta técnica adaptativa.

Outros pesquisadores a lidarem com o problema da determinação do número de kanbans foi Takahashi, Nakamura e Ohashi [Takahashi 96]. Neste trabalho realizaram a simulação do sistema de produção utilizando a linguagem SLAM. O sistema kanban simulado foi o de 2 cartões para um sistema de produção serial desbalanceado, sobre condições estocásticas. Através da simulação foram obtidas informações do sistema que foram utilizadas por um algoritmo para a alocação dos kanbans através da procura direta, de forma a otimizar o desempenho do sistema produtivo.

Neste trabalho verificaram que, assim como as condições estocásticas dos tempos de produção e transporte do sistema de produção, o desbalanceamento representa um problema para o sistema kanban.

Já Aytug, Dogan e Bezmez [Aytug 96] desenvolveram uma metodologia para alocação dos kanbans de forma que a possibilidade de não satisfação da demanda entre os centros de trabalho fossem minimizada, mantendo o ciclo de produção em níveis aceitáveis. A abordagem integrada utilizada, combinou a simulação com as técnicas de análise de regressão. Os resultados da pesquisa sugeriram que o aumento do número de kanbans de um dos produtos finais leva ao aumento do ciclo de produção dos outros produtos também.

Uma outra linha de investigação do sistema kanban não pretende calcular o número de kanbans, mas sim analisar o comportamento deste em relação a outros parâmetros do sistema produtivo. Os estudos que empregaram a simulação para este tipo de abordagem são citados a seguir, tendo os seus resultados utilizados como guia na etapa de análise do sistema kanban proposta pelo presente estudo.

Como exemplo deste tipo de estudo pode-se citar o realizado por Savsar et al. [Savsar 95]. O modelo foi desenvolvido na linguagem SIMAN, sendo utilizado para realizar diferentes experimentos de forma a responder a questões relativas a performance da produção JIT. Os experimentos realizados neste trabalho buscaram avaliar os efeitos randômicos dos tempos de processo, do número de kanbans entre

estações de trabalho, da variabilidade da demanda, do tamanho da linha de produção e de diferentes políticas de administrar o sistema kanban. As medidas de avaliação utilizadas para aferir a performance dos sistemas produtivos foram a taxa de produção, estoque em processo e a taxa de utilização das estações de trabalho.

O sistema produtivo modelado era constituído de uma linha de produção operando com o sistema kanban, produzindo somente um tipo de peça. Em todos os experimentos de simulação realizados, o fornecimento de matéria prima no início da linha esteve sempre disponível, enquanto que a demanda de produtos acabados na saída da linha foi fixa ou, variava randomicamente em função do teste proposto.

Os resultado dos experimentos realizados foram apresentados na forma de gráficos, a partir dos quais o comportamento do sistema produtivo foi analisado. A partir da análise, os autores apresentaram conclusões sobre o comportamento do sistema modelado em relação as variáveis em estudo, que entretanto são de difícil extrapolação para outros sistemas pelo fato da simplicidade do sistema modelado.

Outros resultados interessantes relativos ao sistema kanban nesta mesma linha de pesquisa foram apresentados por Changchit e Kung [Changchit 90], que concluíram que simplesmente aumentando o número de kanbans (nível de estoque) não se pode resolver os problemas de gargalo. Gupta e Gupta, Huang et al. e Shoer et al. apud Chu e Shih [Chu92] confirmaram que altas taxas de produção são obtidas quando o tamanho dos estoques (número e tamanho dos kanbans) é ótimo, mas que aumentando meramente o número de kanbans não implica no aumento da taxa de produção. Gupta e Gupta e Huang et al. apud Chu e Shih [Chu92] também mostraram que o aumento na variação do tempo de processo leva a redução da taxa de produção e ao aumento da escassez de matéria prima, com a manutenção dos níveis de estoque. Huang et al., Kimura e Terada e Villeda et al. apud Chu e Shih [Chu92] demonstraram que em sistemas de puxar com variabilidade no estágio final de montagem, o efeito desta variabilidade é transmitido e amplificado para o

sistema inteiro, acentuando a necessidade de se reduzir a variabilidade no estágio final do sistema produtivo.

Como resultado desta pesquisa bibliográfica, verificou-se a existência de vários estudos tratando do problema do número de kanbans alocados, mas pobre em estudos que abordam a questão da quantidade de peças por kanban e de como esta variável é influenciada pelos outros fatores do sistema produtivo. Os poucos trabalhos encontrados na bibliografia utilizaram a abordagem matemática ao problema, tendo os resultados as limitações inerentes a este tipo de solução.

Desta forma, buscou-se desenvolver uma metodologia para o ajuste dos parâmetros do sistema kanban, ou seja, a quantidade de peças por kanban e número de kanbans alocados auxiliado pela simulação computacional. Além disto, pela análise dos resultados da aplicação da metodologia, procurou-se investigar como o sistema produtivo se comporta com a variação dos parâmetros do sistema kanban de forma a compreender seu mecanismo de funcionamento.

No capítulo seguinte descreve-se a metodologia desenvolvida para o ajuste dos parâmetros do sistema kanban, explicando seus passos. O modelo computacional da fábrica JIT para o qual se aplica a metodologia de ajuste do sistema kanban também é apresentado, assim como o processo de modelagem deste.

CAPÍTULO III

3. METODOLOGIA PROPOSTA

Neste capítulo apresenta-se a metodologia desenvolvida para o ajuste dos parâmetros do sistema kanban. Além do ajuste do sistema kanban, a metodologia proposta propicia investigar como o sistema produtivo se comporta com a variação dos parâmetros do sistema kanban, quais as penalidades ao sistema kanban caso as condições de operação da Filosofia JIT não se concretizem, assim como, quais os ajustes ao sistema kanban nestas condições adversas.

No sentido de testar essas idéias, será apresentado neste capítulo, um modelo computacional de simulação de um sistema produtivo hipotético operando segundo a lógica da Filosofia JIT, abordando-se as questões relativas a obtenção de dados representativos pela simulação deste modelo computacional.

3.1. METODOLOGIA DE AJUSTE DO SISTEMA KANBAN

A partir da revisão bibliográfica realizada no capítulo anterior, verificou-se que a maioria dos trabalhos sobre o sistema kanban abordam a questão do cálculo

Biblioteca Universitária
UFSC
0.272.548-6

do número de kanbans alocados em cada supermercado do planta fabril. Entretanto, o ajuste do sistema kanban compreende também a determinação do tamanho do lote de produção.

Aplicando-se os resultados destes estudos pode-se ajustar o número de kanbans, porém poderia-se chegar a um tamanho de lote que não proporcionasse as melhores condições de operação do sistema produtivo. Além disto, estes dois parâmetros se interrelacionam, obtendo-se melhores benefícios da utilização do sistema kanban com o ajuste simultâneo da quantidade de peças por kanban e número de kanbans.

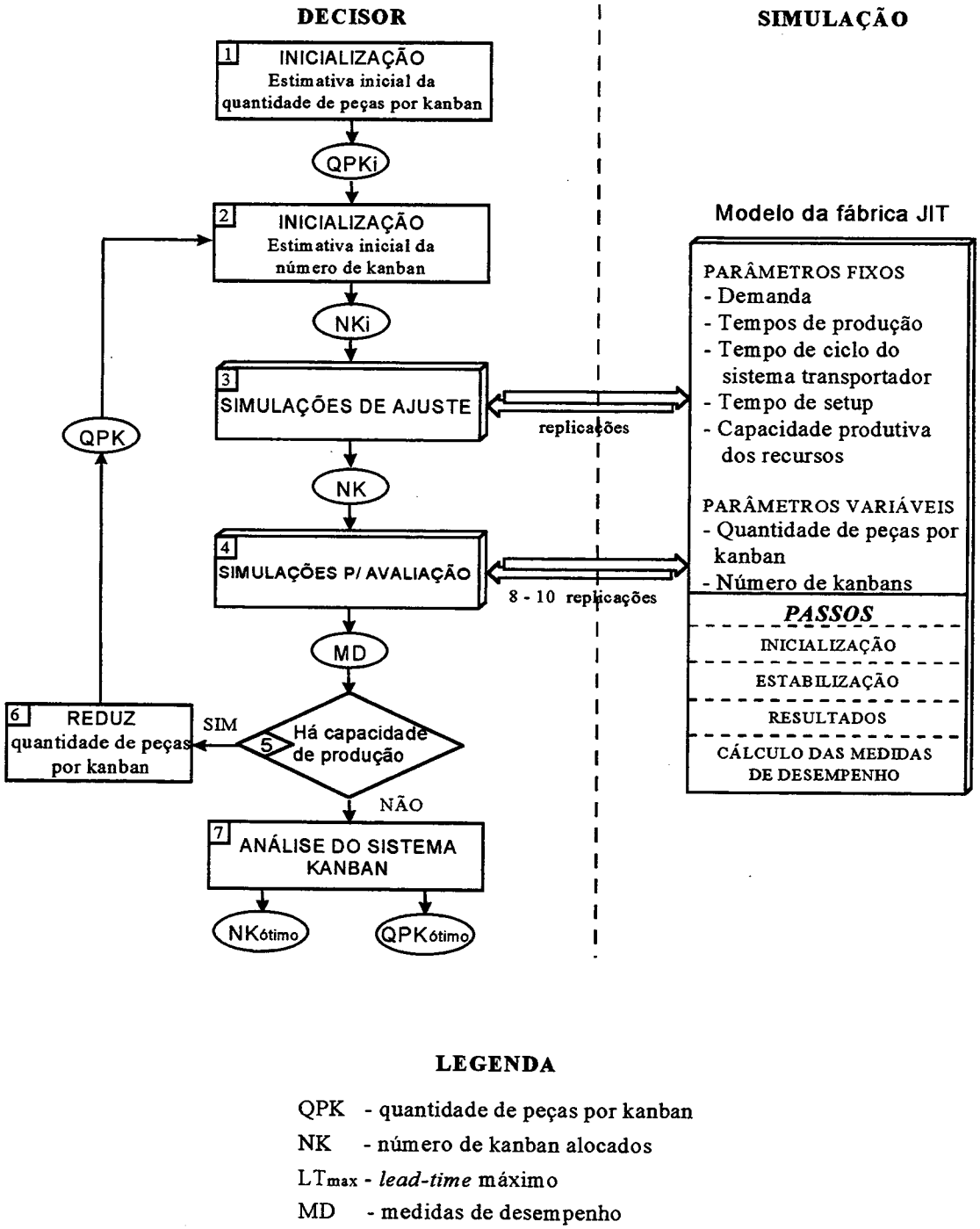
Visando ajustar estes dois parâmetros do sistema kanban, desenvolveu-se a metodologia esquematizada na figura 3-1. Além do ajuste do sistema kanban, os resultados da metodologia propiciam a análise do comportamento do sistema produtivo em relação à variação das quantidades de peças dos kanbans.

No presente trabalho, a capacidade do contenedor foi padronizada para todos os tipos de peças do sistema produtivo. Esta simplificação foi realizada para reduzir o número de variáveis tratadas. Caso cada tipo de peça tivesse um contenedor com capacidade diferente, teriam-se tantas variáveis quanto fossem os tipos de peças.

O princípio básico da metodologia consiste na quantificação do desempenho do sistema produtivo, através de índices, para diferentes quantidades de peças por kanban, após terem sido ajustadas as quantidades de kanbans. A partir dos resultados, pôde-se inferir sobre a faixa de tamanho de lotes para a qual se obtém o melhor desempenho global da planta fabril, de acordo com as metas da Filosofia JIT.

Na aplicação da metodologia os parâmetros de operação do modelo computacional são fixos segundo um cenário produtivo, no qual varia-se as quantidades de peças por kanban e o número de kanbans alocados. Além destes parâmetros, as quantidades e os tipos de produtos produzidos, estabelecidos pelo

Plano Mestre de Produção, são mantidos inalterados em um dado cenário produtivo. Esta meta de produção é atingida em todas as condições de operação testadas, sendo o objetivo investigar qual propicia melhor desempenho de acordo com a ótica da filosofia JIT.



LEGENDA

QPK - quantidade de peças por kanban
NK - número de kanban alocados
LT_{max} - *lead-time* máximo
MD - medidas de desempenho

Figura 3-1 *Esquematização da metodologia proposta para o ajuste do sistema kanban.*

A etapa inicial da metodologia (quadro 1 da figura 3-1) consiste na estimativa do tamanho do lote de forma que os recursos produtivos operem com parte de sua capacidade ociosa. Isto é possível através do emprego de quantidades altas de peças por kanban, resultando em menos alternância do tipo de peça produzida pelas máquinas e, conseqüentemente, na realização de poucos *setups*. O tempo de *setup*, a capacidade dos recursos produtivos, o tempo de processamento das peças e a demanda são os parâmetros que influenciam a estimativa inicial da quantidade de peças por kanban.

Por representar uma condição não otimizada do sistema kanban em relação ao tamanho do lote, assegura-se que o desempenho do sistema produtivo melhore com a aplicação da metodologia, e assim que a condição de operação ótima esteja contida na faixa de operação investigada.

Na etapa seguinte da metodologia (quadro 2 da figura 3-1) estima-se empiricamente o número inicial de kanbans para que o sistema produtivo opere com folga em relação a este parâmetro. O sistema assim ajustado representa uma condição não otimizada de operação do sistema produtivo, em relação ao número de kanbans alocados. Apesar de não estar otimizado, assegura-se que o sistema de produção opere sem que haja problemas de falta de itens nos supermercados.

A seguir, através da etapa de ajuste do número de kanbans da metodologia (quadro 3 da figura 3-1) otimiza-se o sistema kanban em relação a este parâmetro. O procedimento de ajuste do número de kanbans é o cálculo interativo deste valor através da equação 3-1. Os passos que ajustam as quantidades de kanbans, foram desenvolvidos baseando-se no trabalho realizado por Rees et al. [Rees 87] e são apresentados na figura 3-2.

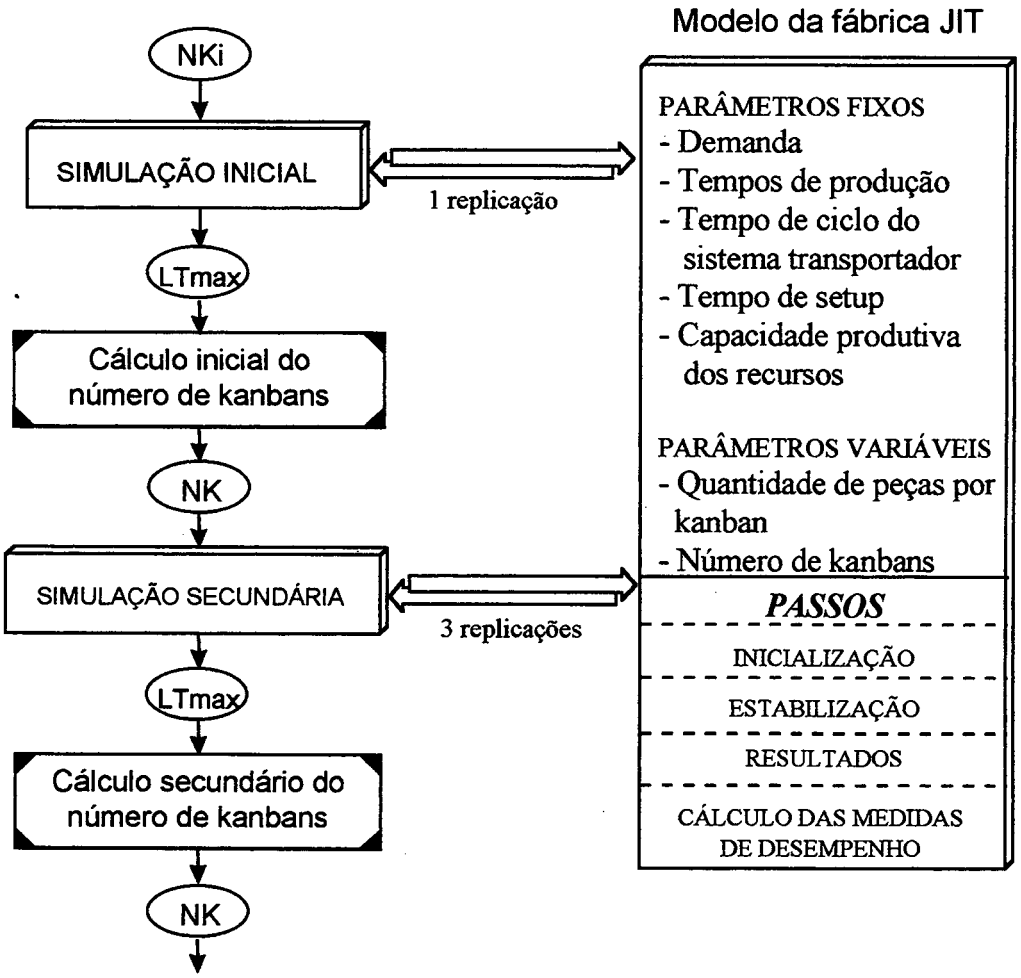


Figura 3-2 *Passos do ajuste do número de kanbans. Etapa 3, figura 3-1.*

Os parâmetros de entrada da equação 3-1 empregado no cálculo do número de kanbans são a demanda por kanbans, o *lead-time* e o coeficiente de segurança. Dependendo do passo que se está executando, estes parâmetros assumem diferentes valores.

- A demanda por kanbans dos itens é calculada a partir do Plano Mestre de Produção para bens acabados da empresa.

- Os valores dos *lead-times* máximos de produção e transporte das peças são estimados a partir da simulação do modelo da fábrica JIT.

- Estipula-se o coeficiente de segurança em função da precisão da estimativa do *lead-time* e da aplicação dos resultados.

$$n_{kanban} = \left[D \cdot LT_{max}\right] * C_s \qquad (3\text{-}1)$$

onde:

n_{kanban} - número de kanbans

D - demanda prevista em kanbans

LT_{max} - *lead-time* máximo de produção ou transporte dos kanbans

C_s - coeficiente de segurança

Inicialmente, com a condição de operação determinada pelas etapas 1 e 2 implementada, o *lead-time* máximo de produção e transporte de cada item é obtido através da simulação do modelo computacional da fábrica JIT. A partir destes valores, o número inicial de kanbans é calculado pela equação 3-1 aplicando-se um valor alto para o coeficiente de segurança. Como o processo é interativo, nos passos seguintes pode-se refinar o número de kanbans calculados, partindo-se de um valor próximo do procurado. Sendo este um primeiro cálculo do número de kanbans, somente uma replicação é realizada.

Calculados os valores iniciais do número de kanbans, estes são implementados para que sejam obtidos valores mais precisos dos *lead-times* das peças. Este passo foi denominado de simulação secundária, no qual três replicações do modelo da fábrica JIT são realizadas, pois pretende-se inferir sobre a variabilidade das resultados obtidas.

Na simulação secundária, o valor do *lead-time* máximo de cada item é obtido para cada uma das três replicações. A seguir, calcula-se através da equação 3-1 o número de kanbans utilizando-se a média dos *lead-time* máximos obtidos nas replicações para cada item. Estipula-se para este cálculo um coeficiente de segurança menor, pois as incertezas em relação aos *lead-times* são menores que as da simulação inicial.

O estoque constituído pelo número de kanbans assim calculados, representa o mínimo possível para suprir a demanda durante o tempo máximo do seu

ressuprimento. O tempo de ressuprimento máximo é o *lead-time* máximo de produção para os supermercados de itens processados e o *lead-time* máximo de transporte para os supermercados de matéria prima. Por ser este o estoque mínimo para um dado tamanho de lote, o número de kanbans calculados representa a condição ajuste do sistema kanban em relação a este parâmetro para um dado tamanho de lote de produção.

Encerrado o ajuste do número de kanbans, este resultado é implementado ao modelo computacional da fábrica JIT. No sentido de avaliar o desempenho do sistema produtivo para esta condição de operação (quadro 4 da figura 3-1) propõe-se um conjunto de índices, na forma de medidas de desempenho. Na avaliação de sistemas estocásticos não é possível associar um único valor para os dados obtidos através da simulação. Porém, realizando-se várias replicações, pode-se desenvolver uma distribuição de probabilidade dos valores que este critério pode assumir. A partir desta distribuição, usualmente, calcula-se um valor médio deste critério e o respectivo intervalo de confiança. Desta forma, no cálculo das medidas de desempenho, realizam-se várias replicações do modelo simulado já com o número de kanban ajustados. Esta etapa foi denominada de simulação para avaliação apresentando-se seus passos esquematizados na figura 3-3.

A medida que as replicações para avaliação do sistema produtivo vão sendo realizadas, testa-se o ajuste do sistema kanban recalculando-se o número de kanbans. Para tanto, emprega-se o procedimento do passo do cálculo secundário descrito anteriormente. Caso se verifique que a média do número de kanbans calculados esteja 10% abaixo do número de kanbans empregados pelo modelo da fábrica JIT, estas quantidades são reduzidas para o valor médio calculado. Por outro lado, caso ocorra falta de itens em algum dos supermercados do sistema produtivo (indicado pela medida de desempenho backorder), o número de kanbans é aumentado para sanar este problema. Em ambos os casos de alteração deste parâmetro, a etapa de simulação para avaliação é reiniciada após terem sido implementadas as alterações, descartando-se os dados obtidos anteriormente. Esta parte da metodologia é apresentada na figura 3-3.

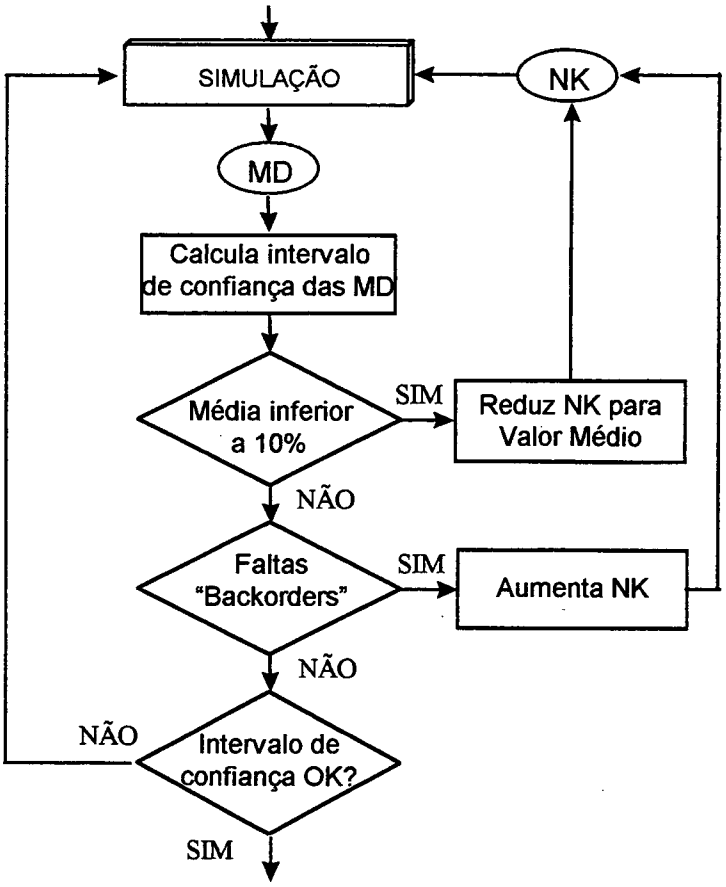


Figura 3-3 *Passos da etapa de avaliação e verificação do sistema produtivo. Etapa 4 da figura 3-1.*

No gráfico da figura 3-4 apresenta-se o que ocorre com o número de kanbans a medida em que as etapas 3 e 4 da metodologia se sucedem. A linha contínua representa a soma das quantidades de kanbans utilizadas no sistema produtivo e a linha tracejada a soma das quantidades de kanbans mínima para ajuste do sistema kanban calculadas a cada replicação. É interessante observar que na primeira replicação na qual se utilizou o maior número de kanbans, a quantidade mínima calculada necessária é menor que para as outras replicações. Isto se deve ao fato do *setup* ser realizado menos vezes com a utilização de lotes grandes de kanbans, reduzindo o tempo médio gasto nesta atividade e, conseqüentemente, o *lead-time* de produção das peças. Contudo, nesta situação inicial, os estoques médios do sistema produtivo são elevados.

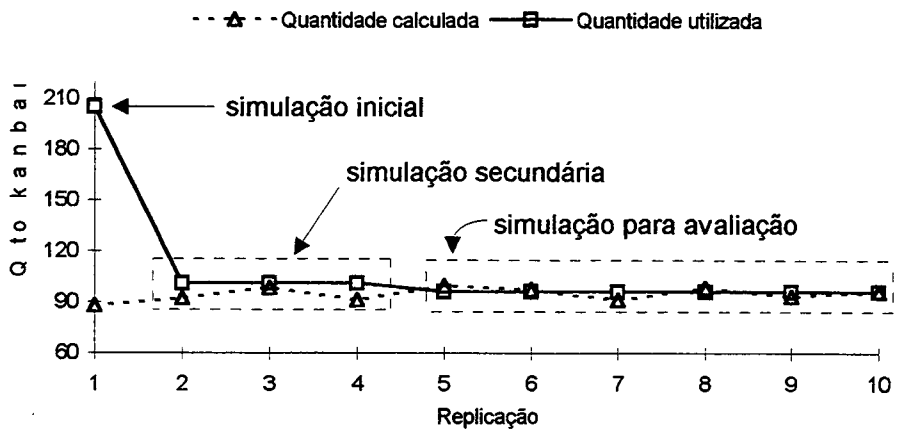


Figura 3-4 *Exemplo da aplicação da metodologia de ajuste do número de kanban.*

Obtidas as medidas de avaliação do sistema produtivo estabilizado, a etapa seguinte consiste em se analisar se há capacidade produtiva disponível nos recursos (quadro 5 da figura 3-1). Caso não sejam encontrados recursos gargalos, existe a possibilidade de redução do tamanho do lote.

Reduzindo-se o tamanho do lote (quadro 6 da figura 3-1), inicia-se outro *lopping* de análise de um tamanho de lote, conforme a metodologia já descrita, retornando-se à etapa da estimativa do número de kanbans alocados.

Ao se reduzir a quantidade de peças por kanban, o percentual de redução deste parâmetro varia em função da taxa de ocupação do recurso gargalo. Para baixa ocupação, a redução da quantidade de peças por kanban é maior, enquanto que a medida que a ocupação for aumentando, a redução diminui. Desta forma, na faixa de quantidade de kanbans perto do ponto de gargalo, são avaliados um número maior de condições de operação do sistema produtivo, permitindo uma análise mais refinada nesta região.

Com a redução do tamanho do lote aumenta o tempo despendido realizando *setup*, fazendo que os recursos fiquem mais ocupados, e num dado momento, apareça um recurso gargalo que limitará a capacidade de produção do sistema produtivo. Neste ponto o processo de redução do lote é interrompido e as condições de operação do sistema produtivo avaliadas através das medidas de

desempenho levantadas para cada par de tamanho de lote e número de kanbans (quadro 7 da figura 3-1). A partir da análise conjunta das medidas de desempenho, determina-se a melhor alternativa de tamanho do lote e número de kanbans para a qual obtém-se maior ganho para o sistema produtivo segundo a ótica da filosofia JIT, encerrando-se a metodologia proposta.

Apresentada a metodologia para ajuste do sistema kanban, descreve-se a seguir as medidas de desempenho empregadas por esta metodologia.

3.2. SISTEMA DE AVALIAÇÃO

Para avaliar a performance de um sistema produtivo existem vários tipos de medidas de desempenho. A escolha do tipo e de quais medidas utilizar depende não só do que se pretende avaliar, mas também do tipo de sistema produtivo que se está avaliando [Tubino 96].

Alguns dos objetivos específicos do sistema de avaliação do chão de fábrica em estudos envolvendo a simulação são [Banks 96]: analise da resposta sobre condições de pico, identificar a capacidade do sistema, identificar as causas dos problemas e analisar a resposta do sistema quando problemas de curta duração causam congestionamento e formação de estoques.

Seguindo os passos propostos por Tubino e Danni [Tubino 96] e os objetivos listados acima, propôs-se a utilização de um conjunto de medidas de desempenho que avaliassem o sistema produtivo diretamente, descritas a seguir:

MD1 - *lead-time* de produção e movimentação - tempo compreendido entre o pedido de um item e a sua entrega ao supermercado que o solicitou, suprindo a carência deste item. Os valores do *lead-time* médio indicam a velocidade de resposta dos recursos produtivos e transportador ao atendimento da demanda. Quanto menor o *lead-time* de produção, mais facilmente se consegue adaptar a produção ao mix da demanda. Com *lead-time* menores as informações fluem mais rapidamente pela planta fabril e os

problemas identificados mais rapidamente, podendo-se tomar medidas corretivas. O *lead-time* máximo determina as quantidades de kanbans nos supermercados do sistema produtivo, de acordo com a metodologia utilizada no presente estudo.

MD2 - estoque em processo (WIP) - enquanto nos sistema tradicionais de produção o estoque são considerados úteis para proteger o sistema produtivo contra problemas que podem causar a interrupção do fluxo de produção, no JIT, visa-se a eliminação destes problemas evidenciando-os pela redução dos estoques. Assim, uma das principais metas da filosofia JIT é a redução dos estoques em processo. A quantidade de estoques em processo necessários para atender uma determinada demanda relaciona-se de forma direta com a eficiência do sistema produtivo, pois quanto maior o nível de estoques intermediários, maiores os custos diretos e indiretos, associados aos produtos fabricados.

MD3 - percentual de kanbans cheios - é o percentual médio de kanbans fixados a contenedores cheios, ou seja, com as peças já processadas, em relação a quantidade total de kanbans. Esta medida fornece a indicação de quanto dos estoque estão sendo efetivamente empregado pelo sistema produtivo e também a quantidade de kanbans vazios esperando para serem produzidos.

MD4 - taxa de utilização dos centros de trabalho - como no JIT só se produz havendo o consumo, esta medida de desempenho avalia o balanceamento dos elos da cadeia produtiva, assim como, a eficiência do sistema de transporte em manter os estoques sempre supridos. É também uma forma de avaliar a flexibilidade do sistema produtivo. Para dois sistemas produzindo a mesma quantidade de produtos acabados, o sistema com menor taxa de utilização (em função, por exemplo, de uma maior racionalização da realização dos *setup*) pode absorver melhor um aumento da demanda.

MD5 - taxa de utilização do recurso gargalo - tem por função, além das mesmas da MD4, indicar o limite mínimo do tamanho do lote para o qual é possível suprir a demanda. Desta forma esta medida de desempenho foi empregada na metodologia, para a determinação da capacidade deste recurso em absorver uma redução na quantidade de peças por kanban, servindo como critério de parada.

MD6 - número de backorders - número de pedidos que não são atendidos em função da escassez de produtos nos estoques. É empregado para indicar a necessidade do aumento do número de kanbans de transporte e de produção dos centros de trabalho.

O volume de produção é uma das medidas de desempenho mais empregadas na avaliação de sistemas produtivos, tendo como objetivo medir a quantidade de produtos fabricados num determinado período. Entretanto, neste trabalho não se utiliza esta medida de desempenho pois, para todas as condições avaliadas, o volume de produção foi o mesmo, estabelecido pelo Plano Mestre de Produção.

Descrita a metodologia para ajuste do sistema kanban e as medidas de avaliação empregadas para quantificar o desempenho do sistema produtivo, apresenta-se a seguir o modelo computacional da fábrica JIT através do qual foi realizado o estudo. Além das características do sistema de produção, descreve-se o processo de modelagem e simulação, bem como as questões relativas ao tratamento estatístico inerentes à obtenção de dados através da simulação.

3.3. MODELO DA FÁBRICA JIT

Neste item será apresentado o modelo da fábrica JIT utilizado para o estudo, explicando-se o processo através do qual foi realizada a simulação deste, bem como as premissas empregadas, inerentes ao processo de simulação. Posteriormente, é apresentado o tratamento estatístico aplicado aos resultados do estudo do sistema kanban. O modelo computacional de simulação foi desenvolvido

com a utilização do software Arena. A linguagem de programação SIMAN é empregada, assim como extensões desta, formada por templates do Arena.

3.3.1. Etapas da Simulação da Fábrica JIT

Como descrito no capítulo 2, no sistema de produção JIT a ordem para o início do processo produtivo é comandada pela demanda dos produtos. Ou seja, a produção é puxada pelo consumo do cliente, interno ou externo, sendo empregado o sistema kanban como gerenciador da produção puxada.

Esta lógica de gerenciamento da produção apresenta características diversas do sistema convencional de empurrar a produção. Desta forma, uma das primeiras etapas na simulação de sistemas JIT é a modelagem desta lógica de produção.

A linguagem SIMAN e os templates desenvolvidos para o Arena são genéricos, podendo ser utilizados para diferentes aplicações. Entretanto, por não serem orientados para a simulação da produção puxada, é necessário o desenvolvimento de uma lógica que incorpore estas características.

O processo de simulação é realizado através do estudo do fluxo das entidades pelo sistema, sendo o modelo uma representação gráfica dos processos pelos quais as entidades se movem. O termo processo é utilizado para indicar uma seqüência de operações ou atividades do sistema. O termo entidade é utilizado de maneira genérica denotando qualquer pessoa, objeto, ou coisa - real ou abstrata - que ao se movimentar causa mudanças no estado do sistema.

Foram utilizados os passos de simulação desenvolvida por Pegden et al. [Pegden 95], descrita no capítulo 2, para o desenvolvimento desta etapa do trabalho. Existem outras metodologias de simulação, como a descrita por Banks [Banks 96], que apesar de diferirem na organização dos passos do processo, apresentam a mesma estrutura.

Na definição do sistema de produção simulado teve-se em vista os objetivos do JIT. Assim, o modelo foi delimitado de forma a apresentar características

comuns em sistemas de produção JIT com produção seriada com pequena variedade de produtos.

3.3.2. Modelo do Sistema de Produção da Fábrica JIT

Para a realização do estudo, é proposto um sistema de produção hipotético formado de três centros de trabalho e uma linha de montagem com 4 postos de montagem, operando no sistema *stop-and-go*, conforme pode ser visto esquematicamente na figura 3-5.

Como o modelo foi desenvolvido para ser aplicado ao estudo do comportamento do sistema kanban, os centros de trabalho foram modelados de forma a representar uma máquina ou uma célula com um conjunto de máquinas. Estes centros de trabalho foram tratados como um ponto do sistema produtivo composto de um supermercado de matéria prima na entrada do processo, e um supermercado de itens processados na saída do processo, não interessando os estoques internos ao centro de trabalho.

Com o objetivo de representar um sistema produtivo genérico, com interações em todos os sentidos, determinou-se que dois dos centros de trabalho realizassem operações em quatro tipos diferentes de peças, cada uma destas com tempo de processamento próprio. O terceiro centro de trabalho realizaria operações de montagem envolvendo duas peças, sendo uma proveniente de fornecedor externo e a outra de um centro de trabalho interno.

Na figura 3-5 é apresentado o diagrama do fluxo de peças. O fluxo representado por uma linha contínua opera no sistema de produção puxada, controlado através do sistema kanban. A linhas pontilhada representa o fluxo de material pela linha de montagem que opera de acordo com o sistema *stop-and-go*. Esta parte da produção é empurrada, sendo as quantidades a serem produzidas estabelecidas pelo PMP.

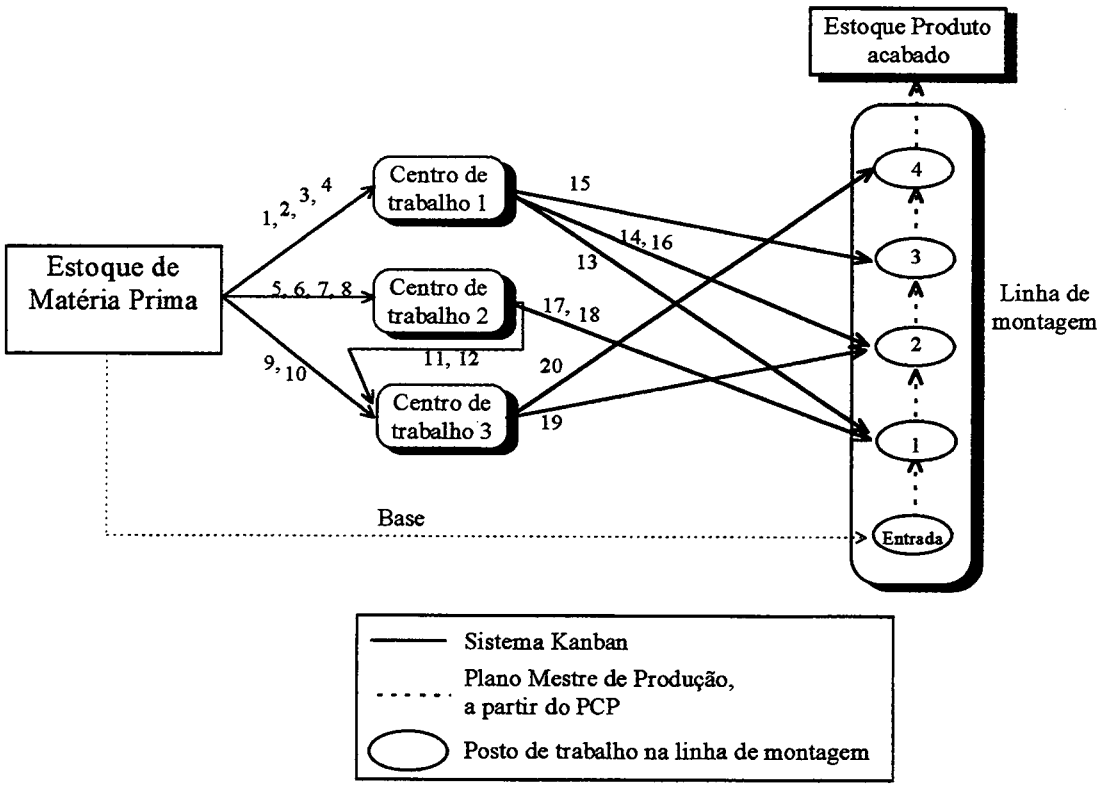


Figura 3-5 *Diagrama do fluxo e controle da produção do sistema em estudo.*

Cada um destes centros de trabalho possuí um estoque de matéria prima (supermercado de matéria prima) e um estoque de produtos processados (supermercado de produtos). A administração destes estoques e dos centros de trabalho é realizado através do sistema kanban.

Estabeleceu-se a quantidade mínima de dois kanbans nos supermercados de matéria prima e de três kanbans nos supermercados de produtos processados. Estes limites mínimos foram estabelecidos para que nos supermercados de matéria prima, enquanto um kanban seja consumido o outro esteja sendo transportado para o supermercado do fornecedor. Já no caso dos supermercados de produtos processados, com a quantidade mínima igual a três kanbans, os níveis de urgência dos kanbans de produção sempre poderiam ser estabelecidos, sendo assim este o número mínimo de kanbans de produção de uma peça.

O sistema proposto para transporte é formado por um transportador com ciclo constante sobre um trajeto fixo passando por todos os centros de trabalho e pela linha de montagem. Em cada um dos pontos de estoque, o transportador para, descarrega as peças destinadas a este estoque e posteriormente carrega as peças produzidas estocadas no supermercado de itens processados contíguo ao supermercado de matéria prima. Considerou-se que os estoques de peças a serem processadas e de peças processadas dos centros de trabalho se localizassem próximos, não havendo a necessidade de locomoção do transportador entre estes dois pontos de estoque.

Os produtos processados pelos três centros de trabalho são fornecidos para uma linha de montagem, que funciona no sistema *stop-and-go*. Simplificadamente pode-se explicar o funcionamento do sistema *stop-and-go* da seguinte forma:

1- A base sobre a qual será montado o produto final é posicionada em uma correia transportadora, representando o início da linha de montagem

2- A base é transportada até o primeiro posto de trabalho sendo parada através de um sistema que interrompe a seu fluxo sem entretanto parar a correia transportadora.

3- Existindo o componente para montagem do tipo específico de produto, esta é realizada com a base interrompendo o fluxo até que tenha sido completada a operação e a base liberada. Não existindo componentes para a montagem, o operador se dirige até o supermercado de matéria prima, trazendo um contenedor até o seu posto de trabalho, realizando a operação a seguir.

4- A base com a primeira montagem realizada segue para o segundo posto de trabalho, permitindo que uma outra base possa ser montada pelo primeiro posto de trabalho, dando continuidade ao fluxo de produtos.

5- Este processo se repete em todos os postos de trabalho até que o produto final esteja montado, sendo retirado da linha de montagem para ser embalado e despachado.

Através deste encadeamento do sistema, a demanda de peças dos centros de trabalho é determinada pela taxa de produção da linha de montagem, que é estabelecida a partir do PMP. O PMP estabelece as quantidades diárias a serem produzidas, o que determina o mix de produção e a taxa de entrada de bases na linha de montagem. Estes parâmetros são fixos na escala de tempo na qual o PMP é atualizado, empurrando a montagem de forma a cumprir com a meta de produção estabelecida. Este tipo de abordagem é a utilizada pela maioria das empresas operando no JIT, sendo por isto empregada no modelo da fábrica JIT.

3.4. MODELO COMPUTACIONAL DE SIMULAÇÃO

No processo de simulação o sistema de produção foi decomposto em subsistemas menores que representassem parte de sua lógica de operação. Cada um dos modelos dos subsistemas foi desenvolvido separadamente, diminuindo o grau de complexidade, o que facilitou grandemente o entendimento do seu funcionamento e das alternativas possíveis de simulação.

Neste sentido, dividiu-se o sistema produtivo nos subsistemas kanban, transporte e linha de montagem. Após obtida uma compreensão do funcionamento e das formas de simular dos subsistemas, estes foram modelados e verificados para que operassem da forma desejada através da validação via animação e análise dos dados gerados.

Sendo obtida a forma de operação desejada, implementou-se cada um dos modelos dos subsistemas ao modelo do sistema de produção, fazendo as alterações cabíveis para a sua adaptação. As características de simulação, a descrição e justificativa da lógica empregada para cada um dos subsistemas é descrita a seguir.

3.4.1. Sistema kanban

A modelagem do sistema kanban foi realizada em duas etapas. Inicialmente desenvolveu-se um modelo simples e, a partir do conhecimento gerado sobre o problema, realizou-se a construção de um modelo mais complexo, que representasse a realidade do sistema proposto para o estudo. Desta forma, foi possível testar diferentes abordagens ao problema em um modelo simples, facilitando a análise dos resultados e conseqüentemente a escolha da alternativa mais apropriada.

O modelo simplificado do kanban de produção foi composto de um centro de produção que processasse somente uma peça, para o qual testou-se diferentes maneiras possíveis de simular o kanban. Dentre as opções computacionais, duas destas se mostraram como as melhores: representar o kanban por uma entidade ou representar o kanban através de variáveis globais. Apesar da primeira opção parecer a mais próxima da realidade, na qual o kanban é um objeto físico, a segunda opção se mostrou a melhor pelo fato de poder ser controlada e computada de qualquer parte do programa. Esta escolha se mostrou acertada, visto que o kanban serve para conduzir as informações da demanda pela planta fabril, não sendo este necessariamente uma entidade física.

Neste modelo inicial a lógica do sistema kanban foi realizada independente da lógica do posto de trabalho. Conseqüentemente, uma vez desenvolvida a lógica de controle, esta pôde ser aplicada para qualquer tipo de centro de trabalho (célula, montagem, etc) com características diferentes (tempo de *setup*, operário móvel, etc), através de pequenas modificações.

A etapa seguinte consistiu em ampliar o modelo para que o centro de trabalho processasse quatro tipos diferentes de peças, cada qual com uma demanda, tempo de fabricação e matéria prima própria. Para a determinação do tipo de peça a ser produzida, o sistema kanban modelado priorizou a peça com o nível de urgência maior.

Para cada peça foi estabelecido um nível de segurança (cor vermelha no painel kanban), ponto de pedido (amarela) e operação normal (verde) que são avaliado em função do seu estoque no supermercado de produtos processados pelo centro de trabalho. Desta avaliação resulta a escolha do lote a ser processado num momento.

Validado o modelo, este pôde ser utilizado como um projeto experimental preliminar, o que possibilitou testar o funcionamento e comportamento do sistema kanban e de alguns parâmetros de eficiência a serem utilizados no estudo. Este modelo básico foi então utilizado como um bloco de representação do sistema kanban para cada ponto do sistema de produção que utiliza sua lógica de controle. A figura 3-6 apresenta a forma final da lógica do sistema kanban que controla o fluxo de peças do centro de trabalho do sistema produtivo.

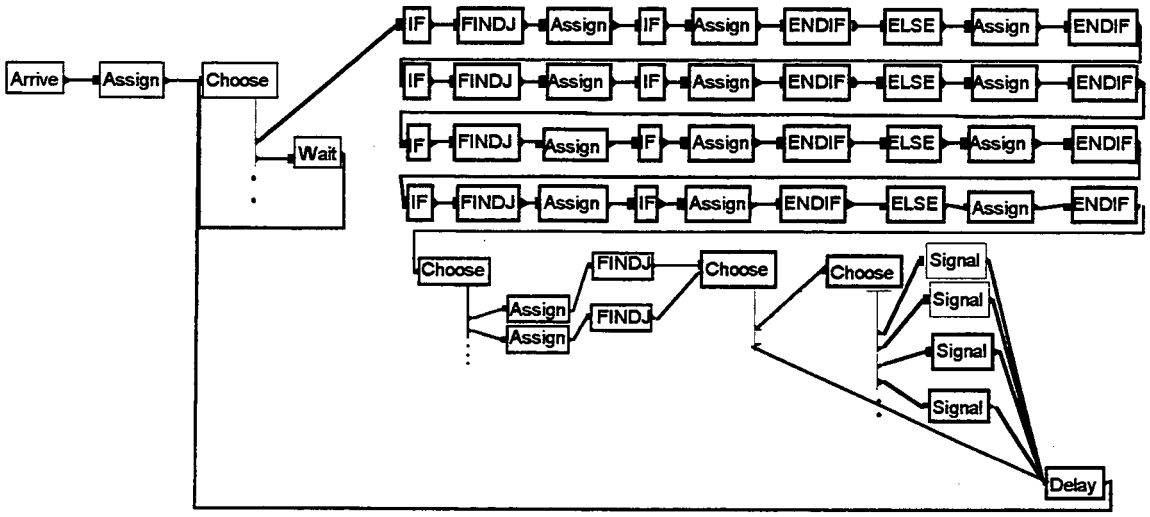


Figura 3-6 *Lógica do sistema kanban que controla o fluxo de peças dentro do centro de trabalho.*

O controle dos kanbans de movimentação das peças foi realizado independente da lógica de controle dos kanbans de produção e da lógica de controle do transportador. Os kanbans de movimentação, da mesma forma que os kanbans de produção, foram controlados através de variáveis globais que são computadas quando o transportador passa nos supermercados de matéria prima e itens processados.

Ao passar nos supermercados de matéria prima, a lógica de controle dos kanbans de movimentação avalia a quantidade de kanbans destacados dos contenedores esperando no quadro de kanban de movimentação. Esta etapa corresponde à retirada pelo sistema transportador dos kanbans de movimentação dos respectivos quadros para serem repostos. Na seqüência, ao passar pelo supermercado fornecedor destes itens, as quantidades de kanbans de movimentação computadas são transportadas. Esta ação corresponde a troca do kanban de produção do contenedor pelo kanban de movimentação e posterior transporte deste. Esta lógica é apresentada na figura 3-7.

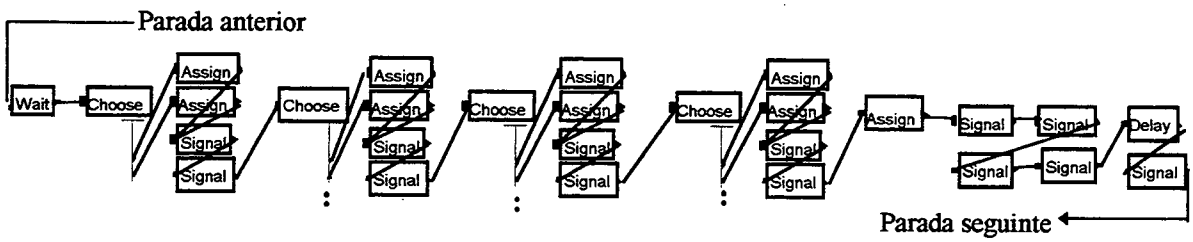


Figura 3-7 *Lógica de controle dos kanbans de movimentação.*

3.4.2. Sistema Transportador

Para simular o transportador estabeleceu-se um trajeto que passasse por todos os pontos de estoque, com uma rota fixa e seqüência de paradas predeterminada. Desta forma, ao percorrer o trajeto o transportador para em todos os pontos de estoque, verificando se há contenedores a serem descarregados e/ou carregados.

O controle de parada, carga e descarga do transportador é realizado através de uma lógica independente, a qual verifica em todas as paradas se há contenedores que tenham como destino o estoque contíguo a esta parada e posteriormente se há contenedores para serem transportados. Também está incorporado a esta lógica o controle da carga transportada, sendo verificado quantos contenedores estão sendo transportados, permitindo ou não o transporte de

outros contendedores em função da capacidade máxima de carga. Esta lógica é apresentada na figura 3-8.

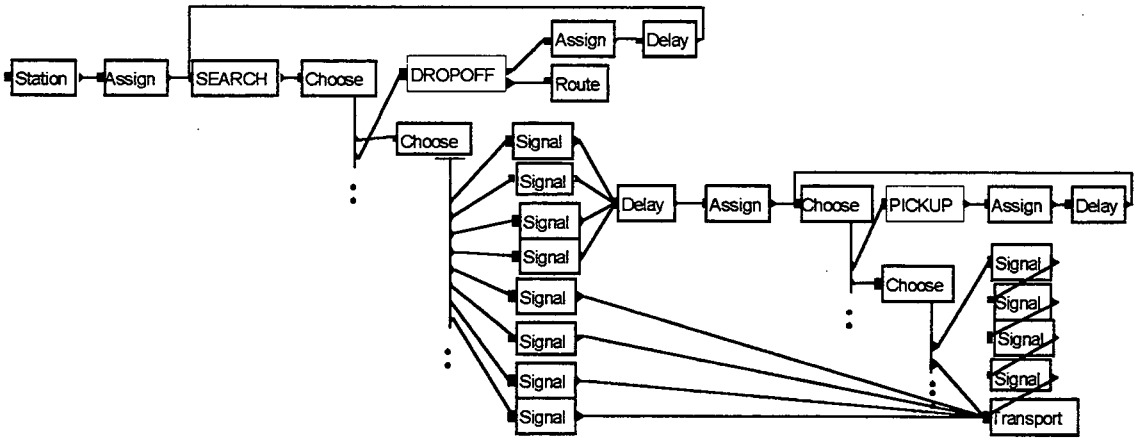


Figura 3-8 *Lógica de controle do sistema transportador.*

3.4.3. Linha de montagem

Na linha de montagem também foi realizado um modelo experimental simplificado para sua simulação, no qual somente um tipo de produto era montado em um posto de trabalho. Após a validação deste modelo, inclui-se a possibilidade de montagem de mais de um tipo de produto utilizando diferentes peças e aumentou-se para 4 a quantidade de postos de trabalho da linha. Este modelo foi incorporado ao modelo com os centros de trabalho representando o "consumidor" dos produtos produzidos por estes.

No modelo desenvolvido para a linha de montagem a velocidade da correia transportadora foi considerada fixa, bem como o seu tamanho, limitando o estoque máximo entre os postos de trabalho. A lógica empregada para a linha de montagem está apresentada na figura 3-9.

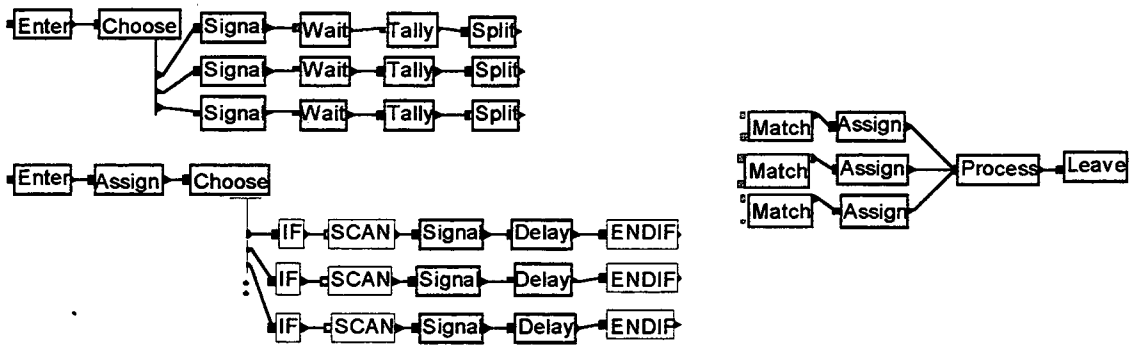


Figura 3-9 *Lógica dos postos de montagem para operação com três peças diferentes.*

3.4.4. Interface externa Arena / planilha eletrônica

Em função da necessidade de alterar os valores das variáveis na execução dos testes com o sistema de produção, foi desenvolvida uma interface com um banco de dados para que fosse possível alterar estes valores sem a necessidade de modificar o modelo. Utilizando-se de um editor de planilha, foi possível realizar as alterações necessárias nos parâmetros de ajuste do sistema produtivo como por exemplo, o número de kanbans, a quantidade de peças por kanban e o tempo de *setup* dos centros de trabalho, sem que fosse alterado o modelo de simulação.

Desenvolveu-se também uma interface com uma planilha para a saída de dados. Esta planilha teve como função não só organizar os dados, mas também tratar os resultados gerados pela simulação de forma que estes representassem as medidas de desempenho propostas.

3.4.5. Restrições e Simplificações

Na maioria dos estudos envolvendo a simulação é necessário proceder algumas simplificações em função da complexidade dos sistemas reais. Segundo Banks [Banks 96], o nível de detalhamento de uma simulação deve levar em conta: a disponibilidade de dados de entrada, o conhecimento de como os componentes do sistema operam e o tipo de análise que se deseja realizar. Entretanto, estas simplificações devem ser feitas de forma criteriosa assegurando-se que o modelo opere de acordo com a realidade modelada. As simplificações empregadas na

simulação do modelo do sistema de produção JIT descrito neste capítulo foram as seguintes:

- Não existem problemas em relação a qualidade na produção e nem foi incorporado ao modelo a quebra de máquinas, pois não se pretendia avaliar este tipo de questão no presente trabalho.

- Sempre há disponibilidade de matéria prima provenientes dos fornecedores, pois pretende-se avaliar o JIT interno. Esta característica é muito comum nas empresas, que normalmente implementam o JIT interno para depois estender esta filosofia a toda a cadeia produtiva.

- O sistema produz apenas três tipos diferentes de produtos, facilitando a análise dos dados e despendendo menos capacidade computacional.

- O sistema transportador não prioriza as peças a serem transportadas.

- Os supermercados de matéria prima e produtos processados de um centro de trabalho são próximos, não necessitando do transportador se locomover entre estes.

- Não foram incluídos no modelo os tempos de transporte entre os supermercados e o centro de trabalho, pois considera-se que estes estão próximos o suficiente para que o tempo de transporte não seja incorporado ao modelo.

- Padroniza-se as capacidades dos contendores para todas as peças, ou seja, os lotes de produção (quantidade de peças por kanban) são os mesmos para todos os tipos diferentes de peças. Esta simplificação é feita para reduzir a quantidade de variáveis analisadas.

3.5. SIMULAÇÃO DO MODELO COMPUTACIONAL

Após a modelagem e validação dos subsistemas estes foram agrupados formando o modelo do sistema produtivo. Apesar das lógicas de controle dos

subsistemas serem independentes, ao serem agrupados os subsistemas influenciaram na forma de operação uns dos outros por estarem interligados. Assim, foram feitos pequenos ajustes antes de se realizarem os testes.

Com o modelo validado, a próxima etapa foi a determinação dos parâmetros da execução da simulação, como a forma de inicialização da simulação, o tempo de execução da simulação e o número de replicações para que os dados gerados fossem estatisticamente confiáveis.

A abordagem empregada para a análise dos resultados de uma simulação depende do sistema modelado ser delimitado ou não-delimitado. Um sistema delimitado tem condições de início fixas e um evento definindo o fim natural da simulação. Os sistemas não-delimitados não possuem condições fixas de início e nem um ponto final natural. Para um sistema não-delimitado, que é o tipo de sistema analisado no trabalho, não existem regras fixas para seleção das condições iniciais e para o tamanho da simulação.

Os sistemas não-delimitados, normalmente passam por uma fase inicial transiente que depende das condições iniciais. Não existe porém um ponto definido em que o comportamento mude de transiente para permanente. Refere-se a uma simulação como operando nas condições permanentes, quando a fase transiente inicial teve o seu efeito diluído ao ponto que a sua influência seja desprezível. Neste tipo de sistemas, normalmente se está interessado na análise do comportamento permanente.

Como se pretende estimar a performance do sistema durante a fase de operação permanente, dados coletados na fase transiente poderão distorcer os resultados. Quando se analisa a performance do estado permanente, deve-se lidar com as distorções introduzidas pelas condições iniciais. As abordagens mais indicadas para lidar com este problema são:

1. Reduzir o período transiente através da seleção das condições iniciais de operação para que as condições de operação permanente sejam mais rapidamente atingidas.

2. Descartar os dados referentes a este período inicial, evitando as distorções causadas pela fase transiente. A forma mais simples e prática é o método de seleção do ponto de truncagem. Adota-se o ponto em que os estoques estão cheios como o fim do período transiente e início da coleta de dados

3. Executar a simulação por um período grande o suficiente de forma que a influência da fase transiente seja minimizada pelos dados coletados durante o período permanente.

A forma de inicialização da simulação foi ajustada baseando-se nos itens 1 e 2 descritos acima. No início da simulação, os estoques do sistema produtivo estão vazios, porém no estado de operação permanente os estoques estão parcialmente cheios e a taxa de consumo destes é da mesma ordem de grandeza da taxa de produção.

Objetivando-se tornar este período inicial o mais curto possível foi desenvolvido um rotina que inicializa o sistema com valores dos tempos de processo, *setup* e transporte menores e com a capacidade do transportador maior. Com a utilização destes parâmetros a taxa de entrada e de fluxo das entidades através do modelo é maior, "enchendo" o modelo mais rapidamente. A partir do ponto em que os estoques estão cheios, os valores destas variáveis retornam aos valores originais iniciando a obtenção dos dados de operação do sistema produtivo após um período de transição, descartando-se os dados gerados neste período.

O segundo parâmetro a ser fixado em uma simulação, o tempo de execução, depende normalmente dos objetivos do analista e do tipo de sistema analisado. Nos estudos de sistemas de manufatura, normalmente este tempo está associado ao ciclo de produção do sistema real, ao período de inicialização e a geração de dados estatisticamente significativos.

Em função dos tempos serem probabilísticos, o tempo de execução da simulação pode introduzir incertezas não desejadas. Mais precisamente, a execução da simulação deve ter um tamanho suficiente de forma que as distribuições de probabilidade não modifiquem, de forma apreciável, os resultados com a execução da simulação por mais um período de tempo. Por exemplo, uma das abordagens utilizadas para determinar o tamanho da simulação é sucessivamente aumentar o tamanho da simulação até que não haja alteração no intervalo de confidência [Davis 87].

Por ser a variável com maior variabilidade, o *lead-time* de produção foi empregado para a escolha do tempo de execução da simulação e do número de replicações feitas para obtenção de dados significativos. Através da inspeção visual do seu comportamento, realizada pelo módulo do Arena para análise de resultados, determinou-se o tamanho da simulação necessário para que o sistema estivesse no estado permanente de operação por um período suficiente para renovação das características de operação.

A renovação das características de operação em uma simulação é uma ocorrência comum em sistemas estocásticos, consistindo no fato de que após um ciclo, o sistema simulado voltar as condições iniciais do ciclo. Após voltar a estas condições inicias, o sistema executa outro ciclo, com o comportamento similar ao anterior. Como resultado, tem-se que o aumento do tamanho da simulação eqüivale a realização de outra replicação. Este comportamento pode ser visualizado pela figura 3-10.

Uma vez determinado o comprimento da simulação, há a necessidade de estabelecer o número de replicações que serão feitas, pois no estudo de sistemas estocásticos, não é possível associar um único valor a um dado critério relativo a uma variável do sistema. Realizando-se várias replicações, pode-se desenvolver uma distribuição de probabilidade dos valores que este critério pode assumir.

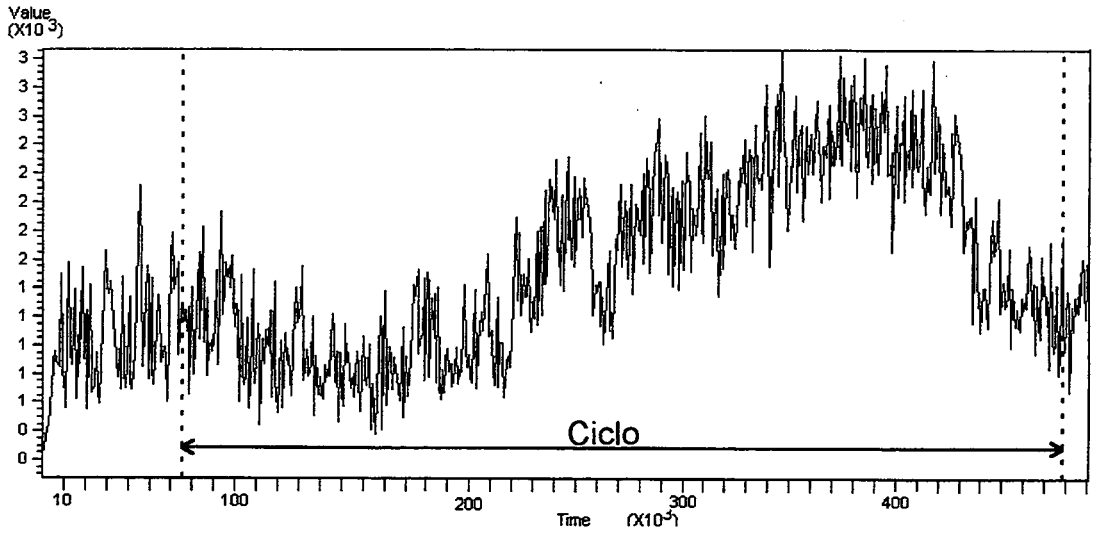


Figura 3-10 *Exemplo do comportamento dos valores do lead-time de produção*

Um dos elementos críticos na simulação consiste na decisão de quantas observações de cada evento devem ser coletadas. Normalmente, assume-se que as observações são independentes uma das outras, o que é possível de se obter com a utilização de diferentes "sementes" (valor inicial a ser utilizado pelo gerador de números randômicos do simulador). Tipicamente, o valor da média das observações é utilizado como o valor do critério para análise da simulação, sendo determinado o número de replicações em função do intervalo de confidência especificado.

O intervalo de confidência define a confiabilidade da estimativa pontual obtida do conjunto de dados coletados. O intervalo de confidência é relacionado tanto com a variabilidade do sistema produtivo modelado, como com a quantidade de dados coletados. Assim, pode-se tornar o intervalo de confidência tão pequeno quanto se desejar, desde que sejam coletados dados suficiente.

Como o *lead-time* de produção apresenta a maior variabilidade dentre as medidas de desempenho, o intervalo de confiança desejado para o *lead-time* de produção determinou o número de replicações realizadas para obtenção de medidas de desempenho estatisticamente confiáveis. O número de replicações foi calculado

através do analisador de resultados do software Arena. Para tanto, foram sendo realizadas replicações até que o intervalo de confiança desejado fosse obtido.

Aplicando a metodologia proposta neste capítulo para o ajuste do sistema kanban do modelo computacional da fábrica JIT, obteve-se um conjunto de dados que serão descritos e analisados no capítulo 4, para dois cenários produtivos diferentes. A partir da análise dos resultados será feito o ajuste do sistema kanban de cada cenário e comparado o desempenho dos dois cenários operando com o sistema kanban ajustado.

CAPÍTULO IV

4. RESULTADOS

Elaborada a metodologia de ajuste do sistema kanban e o modelo computacional da fábrica JIT, aplicou-se a metodologia para o ajuste do sistema kanban da fábrica JIT operando com dois cenários produtivos diferentes.

Neste capítulo, descreve-se a aplicação dos passos da metodologia, os resultados obtidos, a análise destes resultados, o ajuste dos parâmetros do sistema kanban e a comparação do desempenho dos dois cenários operando com o sistema kanban ajustado.

4.1. DESCRIÇÃO DOS PARÂMETROS DO SISTEMA PRODUTIVO

Visando os objetivos propostos para o trabalho, aplicou-se a metodologia de ajuste do sistema kanban ao modelo de fábrica JIT operando com dois cenários produtivos diferentes. Os dois cenários analisados tiveram as mesmas características, diferindo apenas nos tempos de *setup* dos recursos produtivos.

No cenário 1, a média dos tempos de *setup* dos recursos produtivos foi de 30 minutos. Esta foi a condição de operação da fábrica JIT investigada sem que houvesse sido realizada a redução completa dos tempos de *setup*. Ou seja, as condições de operação da filosofia JIT não estavam plenamente concretizadas.

Reduzindo-se os tempos de *setup* dos recursos produtivos para a média de 3 minuto e mantendo-se inalterados todos os outros parâmetros do sistema produtivo, obteve-se a condição de operação do cenário 2, que representa o sistema produtivo mais próximo das metas da filosofia JIT. Em aplicações práticas, a redução do *setup* pode ser alcançada pelo emprego das técnicas de redução de *setup*, como as descritas por Shingo [Shingo 96].

Cabe salientar que a demanda dos produtos acabados (quantidades de cada tipo de produto) foram mantidas constantes para ambos os cenários produtivos, bem como dentro de cada cenário com os diferentes tamanhos de lotes e número de kanbans do sistema produtivo analisado. A demanda média de produtos acabados se manteve constante em 233 unidades por dia, sendo 1/3 de cada tipo (tipo "A", "B" e "C"). No sistema de puxar a produção, a demanda de produtos acabados, se propaga para todo o sistema produtivo resultando na demanda prevista das peças que compõe os produtos acabados.

Peça	Tempo de Produção [seg]	Tempo de *setup* [seg]		Demanda (peças/dia)
		Cenário 1	Cenário 2	
11	26	1350	135	71
12	60	1350	135	71
13	75	1350	180	213
14	30	1350	180	71
15	45	1800	180	71
16	150	1800	180	71
17	75	1800	135	71
18	68	1800	135	71
19	40	2700	270	71
20	50	2700	270	213

Tempo de ciclo do sistema transportador = 1 hora e 30 minutos

Tabela 4-1 *Tabela dos tempos médios do sistema produtivo.*

No modelo da fábrica JIT foram empregadas distribuições estatísticas para os parâmetros do sistema produtivo, representando melhor a realidade simulada. A seleção do tipo de distribuição utilizada foi baseada no trabalho desenvolvido por Muralidhar, Swenseth e Wilson [Muralidhar 92], que realizaram uma seleção dos tipos de distribuições apropriados para descrever os tempos de processo quando simulando sistemas JIT. Os tempos médios de produção, *setup* e de ciclo do sistema transportador foram ajustados com os valores apresentados na tabela 4-1. Nesta tabela também se apresenta a demanda prevista das peças (puxada pela linha de montagem), que serve de parâmetro de entrada da equação 3-1.

4.2. APLICAÇÃO DA METODOLOGIA À FÁBRICA JIT COM AS CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO DO CENÁRIO 1

A primeira condição de operação investigada foi a da fábrica JIT ajustada com os tempos médios apresentados na tabela 4-1 referentes ao cenário 1. Estes parâmetros foram mantidos constantes, enquanto que a quantidade de peças por kanban e número de kanbans foram variados a medida que foi sendo aplicada a metodologia de ajuste do sistema kanban.

Executando-se as etapas da metodologia, assinaladas com 1 e 2 na figura 3-1, estimou-se a configuração inicial do sistema kanban. No cenário 1, a condição de operação superestimada foi obtida pelo emprego de lotes com 320 peças e um total 250 kanbans distribuídos pelos supermercados do sistema produtivo.

A etapa seguinte da metodologia foi o ajuste do número de kanbans para este tamanho de lote. O primeiro passo desta etapa foi a estimativa dos valores dos *lead-times* de produção e transporte de cada peça através da execução do modelo de simulação da fábrica JIT operando com os parâmetros do sistema kanban estimados pelas etapas 1 e 2. A partir destes resultados e da demanda de kanbans calculada através da previsão da demanda dos produtos acabados (tabela 4-1), calculou-se o número de kanbans empregando-se a equação 3-1 com um

coeficiente de segurança igual a 1,5. O total de kanbans alocados no sistema produtivo foi então reduzido para 158 kanbans.

Os tempos de execução das replicações do modelo da fábrica JIT, realizadas neste passo e ao longo da aplicação da metodologia foram padronizados assegurando a realização de pelo menos um ciclo de renovação do sistema produtivo. Apesar de em sistemas de produção JIT a escala de tempo usualmente ser associada ao período de atualização do PMP, este período não foi suficiente para obtenção de dados estatisticamente confiáveis. Assim, o tempo de execução de todas as replicações realizadas neste cenário foi equivalente a 24 meses de produção.

Feito o cálculo inicial do número de kanbans, pôde-se fazer o ajuste fino destas quantidades partindo-se de um valor próximo do procurado. No ajuste fino do número de kanbans, realizaram-se três replicações obtendo-se a média dos valores dos *lead-times* máximos. Com este valor, recalculou-se o número de kanbans utilizando o coeficiente de segurança da equação 3-1 de 1,2. Através deste ajuste fino reduziu-se para 124 o total de kanbans. A etapa seguinte foi a avaliação da fábrica JIT operando com o sistema kanban ajustado com este parâmetro recém calculado implementado ao modelo computacional.

A avaliação do desempenho da fábrica JIT foi realizada executando-se várias replicações do modelo da fábrica JIT. O número de replicações realizadas na avaliação do sistema produtivo é função do intervalo de confiança desejado e, conseqüentemente, da variabilidade das medidas de desempenho. Os valores da variabilidade máxima das medidas de desempenho deste cenário são apresentados na tabela 4-2, onde o desvio médio representa a medida da variabilidade do conjunto de dados e o valor desta medida dividido pela média dos dados, o percentual desta variabilidade.

	LT max Pr	LT medio Pr	LT Transp	Est. Médio	Qto Prod	% Setup	% Busy	% Operando	% K Cheio
Desvio Médio	111	66	0.02	165,7	57,8	0,00	0,00	0,00	0,01
Desv/média	13%	16%	0%	2%	0%	0%	0%	0%	2%

Tabela 4-2 *Variabilidade máxima das medidas de desempenho do cenário 1.*

O intervalo de confiança utilizado para os dados foi selecionado de forma a não criar a necessidade de uma grande quantidade de replicações, pois o tempo computacional necessário em cada replicação foi alto (em torno de 1:30 horas). Em contrapartida, o intervalo de confiança teve de ser estreito o suficiente para não dificultar a análise desejada. Desta forma, realizaram-se de 8 a 10 replicações no passo de avaliação do desempenho do sistema produtivo dependendo da variabilidade do *lead-time* de produção.

Calculadas as medidas de desempenho da fábrica JIT operando com 320 peças por kanban e um total de 124 kanbans distribuídos pelo sistema produtivo, a etapa seguinte consistiu na análise da taxa de ocupação do recurso gargalo. Como a taxa média de ocupação do recurso gargalo foi de 88%, reduziu-se para 230 a quantidade de peças do lote de produção padrão, retornando-se à etapa 2 de estimativa inicial do número de kanbans alocados.

Com o retorno à etapa da estimativa do número inicial de kanbans, foi completado um looping da metodologia de avaliação de um tamanho de lote. Este processo se repetiu até o ponto de ocupação plena do recurso gargalo (82 peças por kanban), a partir do qual com uma redução extra da quantidade de peças por kanban o sistema produtivo não teria capacidade de suprir a demanda. Os valores de tamanho do lote analisados e número total de kanbans ajustados pela metodologia para este tamanho de lote, são apresentados na tabela 4-3.

Qto. Peças por kanban	Num. total de kanbans
82	134
85	131
90	125
100	124
150	124
230	124
320	124

Tabela 4-3 *Número total de kanbans calculado para cada tamanho de lote avaliado pela aplicação da metodologia - cenário 1.*

Através deste processo de redução das quantidades de peças por kanban calculou-se a média e o respectivo intervalo de confiança das medidas de desempenho da fábrica JIT operando com as composições de tamanho de lote e número de kanbans apresentadas na tabela 4-3. Estes valores foram então agrupadas em gráficos para facilitar a visualização e análise comparativa dos resultados. Os gráficos das medidas de desempenho obtidas neste cenário são apresentados e analisados a seguir.

4.2.1. Análise das Medidas de Desempenho do Cenário 1

Conforme apresentado no capítulo 3, foram propostas 6 medidas de desempenho para avaliar o sistema de produção JIT no sentido de verificar qual a melhor composição de tamanho de lote e número de kanbans que atende a uma determinada demanda. Essas medidas são:

- MD1 - *Lead-time* de transporte e produção.
- MD2 - Estoque em processo (WIP).
- MD3 - Percentual de kanbans cheios.
- MD4 - Utilização dos centros de trabalho.
- MD5 - Utilização do recurso gargalo.
- MD6 - Número de *backorders*.

Com relação a primeira medida de desempenho, na figura 4-1 é apresentado o gráfico com os valores da média do *lead-time* médio de transporte das peças e da média dos *lead-time* máximo e médio de produção das peças processadas pelos três centros de trabalho. A incerteza dos resultados é representada pela barra de erros que corresponde ao intervalo de confiança máximo dentre os obtidos para os pontos plotados.

Considerou-se o *lead-time* de produção como sendo o tempo compreendido entre a chegada da ordem de produção até a entrega do lote de peças processadas no estoque do centro de trabalho. Ou seja, entre a retirada pelo sistema transportador de um lote de peças processadas e conseqüente colocação do kanban de produção no quadro de kanbans, e a entrega do lote pronto no estoque do centro de trabalho.

Sendo assim, o *lead-time* de produção pode ser decomposto em: tempo de espera do lote para ser produzido, tempo de ajuste para produção do lote (tempo de *setup*) e tempo de processamento do lote. Não foi incluído o tempo de transporte da lote entre a área de produção e os estoques por este ser pequeno dentro da filosofia JIT e não ter sido modelado na simulação.

Analisando-se este gráfico verifica-se que o *lead-time* médio de transporte é praticamente constante, em torno de 1 hora e 30 minutos, em relação a variação da quantidade de peças por kanban. Este comportamento era esperado pois o tempo de ciclo do sistema de transporte não se alterou com a variação da quantidade de peças por kanban e o transportador teve capacidade de carga suficiente para atender as necessidades de movimentação dos kanbans em toda a faixa de tamanho de lote analisada.

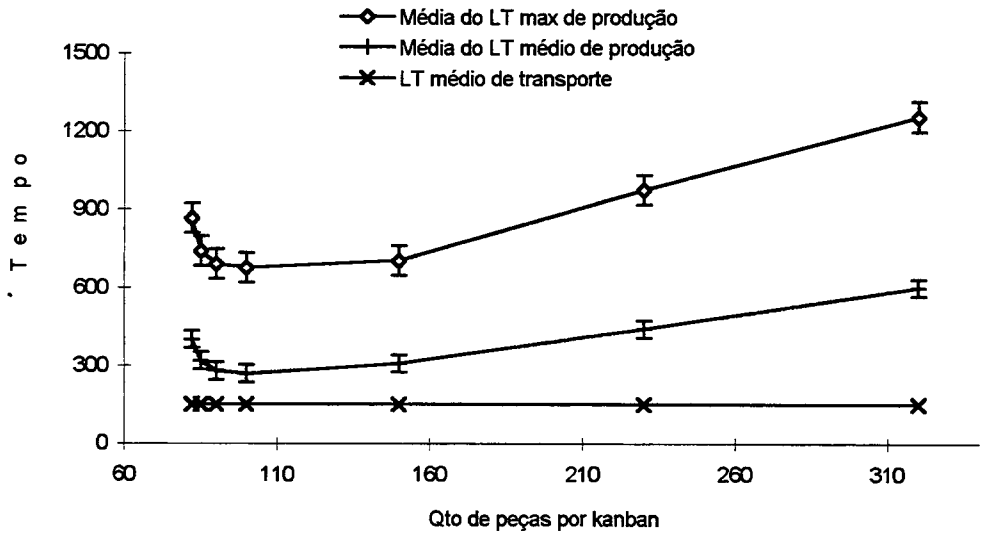


Figura 4-1 *Gráfico da variação dos valores do lead-time médio e máximo de produção e de transporte em relação a variação da quantidade de peças por kanban - cenário 1.*

Já o *lead-time* de produção médio e máximo variaram com a alteração da quantidade de peças por kanban, existindo uma faixa de valores mínimos para estas medidas de desempenho entre 90 a 110 peças por kanban. Este comportamento pode ser interpretado através da análise dos diferentes tempos que compõe o *lead-time* de produção, representados na equação 4-1.

$$LTP_{kanban} = \underbrace{(qpk \cdot tmpp)}_{t_{proc}} + t_{setup} + t_{espera} \qquad (4\text{-}1)$$

onde:

LTP_{kanban} - *lead-time* de produção de um kanban.

t_{proc} - tempo de processamento das peças do kanban.

t_{setup} - tempo de *setup*.

t_{espera} - tempo de espera.

qpk - quantidade de peças por kanban.

$tmpp$ - tempo médio de processamento da peça.

Investigando-se os tempos que compõe o *lead-time* de produção, apresentados no gráfico da figura 4-2, verifica-se que o tempo de processamento

do kanban é proporcional a quantidade de peças por kanban (*qpk*), enquanto que o tempo de *setup* do kanban independe deste parâmetro, sendo constante para um dado cenário produtivo. Já o comportamento do tempo de espera é influenciado pela quantidade de kanbans esperando para serem produzidos, pelo tempo de processamento destes e pela quantidade de *setups* que serão realizados.

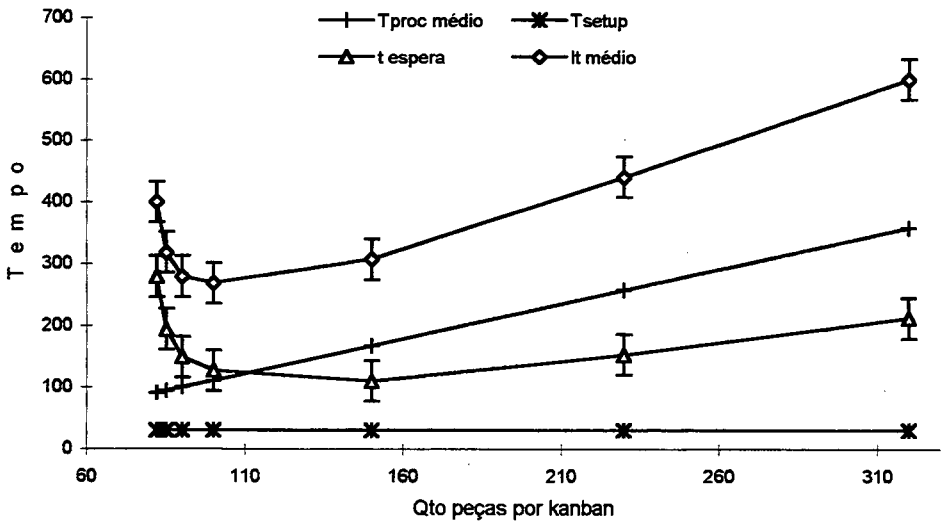


Figura 4-2 *Comportamento dos tempo que compõe o lead-time médio de produção em relação a variação da quantidade de peças por kanban - cenário 1.*

O tempo de espera de um kanban é o resultado da soma dos tempos de *setup* e de processamento de cada um dos kanbans que estão na frente do lote analisado, na fila do centro de trabalho aguardando para serem processados. Conforme pode ser visto no gráfico da figura 4-2, o tempo de espera médio é mínimo para lotes de 150 peças por kanban, aumentando tanto com o acréscimo, como com a diminuição da quantidade de peças por kanban.

Para lotes com mais de 150 peças, o aumento do tempo de espera com o aumento da quantidade de peças por kanban, ocorre devido a influência do tempo de processamento dos lotes que estão na fila de espera. Para tamanhos de lotes inferiores a 150 peças, o aumento do tempo de espera com a redução do tamanho do lote, se dá devido ao aumento do número de lotes que está na fila de espera, e o conseqüente aumento de *setups* realizados entre lotes. Como resultado, os centros

de trabalho ficam mais congestionados e menos disponíveis para processar com rapidez os kanbans que chegam.

Portanto, a medida que a quantidade de peças por kanban diminui, o tempo de processamento se reduz. O tempo de espera também se reduz até um certo ponto, a partir do qual passa a crescer, enquanto que o tempo de *setup* permanece constante, fazendo com que a curva do *lead-time* médio siga a tendência da soma destes tempos.

A partir destas observações, pode-se concluir que no processo de dimensionamento do sistema kanban com *setups* altos, lotes grandes levam a *lead-time* de produção altos devido ao elevado tempo de processamento destes, e lotes pequenos também levam a *lead-time* de produção altos devido ao congestionamento do sistema produtivo. O congestionamento do sistema produtivo acentua-se pelo fato da metodologia proposta empregar o valor do *lead-time* de produção no cálculo do número de kanbans necessários.

O mecanismo de variação do *lead-time* máximo de produção é análogo ao apresentado para o *lead-time* médio de produção. A diferença dos valores reside no fato do *lead-time* máximo de produção ser composto pelo tempo de *setup* máximo, tempo de processamento máximo e tempo de espera máximo.

O tempo de processamento é a soma dos tempos de operação das peças. Apesar do tempo de operação das peças ser variável, como são processadas várias peças, o tempo de processamento tende para um valor praticamente constante não tendo muita diferença entre o valor máximo e médio. Em relação ao tempo de *setup*, a diferença entre o valor médio e máximo é pequena se comparada com os outros termos que compõe o *lead-time* de produção. Já a diferença entre os valores máximos e médio do tempo de espera é grande, pelo fato de variar a quantidade de lotes na fila. Assim, a diferença entre os valores do *lead-time* máximo e médio se dá principalmente pelo fato do tempo de espera máximo ser maior que o tempo de

espera médio em razão da variação da quantidade de kanbans esperando para serem produzidos.

Os valores das medidas de desempenho 2 e 3, estoque em processo e percentual de kanbans cheios, estão representadas nos gráficos das figuras 4-3 e 4-4, respectivamente.

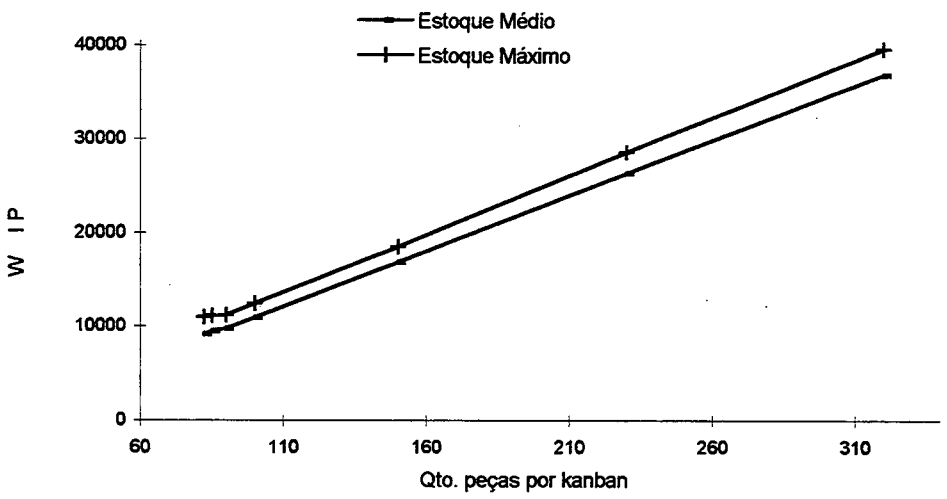


Figura 4-3 *Gráfico da variação do estoque máximo e médio em processo em relação a variação da quantidade de peças por kanban - cenário 1.*

Conforme pode-se ver na figura 4-3, tanto o estoque máximo permitido no sistema, como o estoque médio em circulação diminuem a medida em que se reduz a quantidade de peças por kanban. O estoque máximo em um sistema de produção controlado pelo sistema kanban é definido pelo número de kanbans multiplicado pela quantidade de peças por kanban. Já o estoque médio em processo depende do estoque máximo e do fluxo de consumo e reposição dos kanbans.

Neste primeiro cenário com *setups* altos, o número de kanbans de movimentação necessário para os tamanhos de lotes analisados, calculado pela equação 3-1, tiveram valores inferiores a 0.7 kanbans. Porém, para o correto funcionamento do sistema kanban há a necessidade de no mínimo 2 kanbans de movimentação para cada item, pois em quanto um kanban está sendo movimentado, o outro deve ficar a disposição para ser consumido pelo posto

cliente. Desta forma, o número de kanbans de movimentação para toda a gama de tamanhos de lotes analisada foi de 2 kanbans.

Já o número mínimo de kanbans de produção foi de 3 kanbans visando a implementação das regras de prioridade. Para lotes com mais de 100 unidades, os valores calculados pela equação 3-1 foram inferiores ao mínimo estabelecido e, portanto, fixados em 3 kanbans nesta faixa de operação. Assim, para esta faixa de operação, o total de kanbans ajustados pela metodologia foi independente do tamanho do lote. Para tamanhos de lotes inferiores a 100 unidades, este mínimo foi ultrapassado pela maioria das peças, e conseqüentemente o número total de kanbans diferiu para os lotes analisados nesta faixa de operação.

Em função destes fatores, para lotes com mais de 100 peças, o estoque máximo do sistema produtivo se diferenciou somente devido a variação do tamanho do lote. A partir do ponto em que a quantidade de kanbans aumentou com a redução do tamanho do lote, o estoque máximo também foi influenciado por este parâmetro, mudando o seu comportamento, como pode ser visto pelo gráfico da figura 4-3.

O estoque médio segue a tendência do estoque máximo, diferindo-se deste em função da quantidade de kanbans vazios no sistema produtivo. Do total dos kanbans circulando no sistema produtivo, parte fica esperando para ser produzida ou movimentada, associada a contenedores vazio (kanbans vazios). Estes kanbans se localizam nos quadros de kanbans dos centros de trabalho, nos quadros de kanban do sistema transportador, ou sendo movimentados para o estoque do processo precedente. O restante dos kanbans ficam anexados a contenedores contendo itens (kanbans cheios), localizados nos estoques do sistema produtivo ou sendo movimentados pelo sistema transportador.

Na faixa abaixo de 100 peças, começa a diminuir a relação entre kanbans cheios e vazios, como pode ser constatado pelo gráfico da figura 4-4 e, quando o

percentual de kanbans cheios começa a decrescer abaixo de 90%, o estoque médio se afasta do estoque máximo.

Em função deste fatores, olhando-se apenas para os níveis de estoque do sistema produtivo, pode-se afirmar que neste cenário, o estoque médio está muito alto e próximo do estoque máximo permitido pelo sistema kanban, fazendo com que o percentual de kanbans cheios fique acima dos 83%.

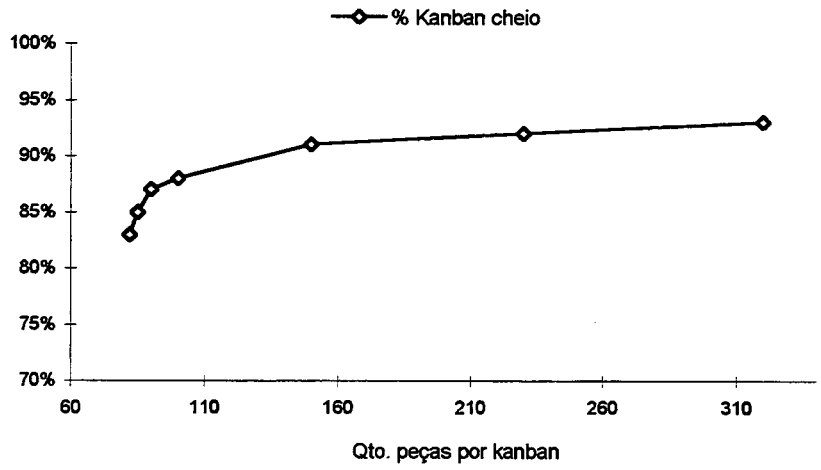


Figura 4-4 *Valores do percentual de kanbans cheios obtidos para os composições do sistema kanban avaliadas - cenário 1.*

Outro ponto a ser investigado é a ocupação dos recursos produtivos. No sistema produtivo modelado considerou-se que os recursos poderiam estar em três diferentes estados. Realizando operações nas peças, realizando *setup* ou inativos. Não foram incluídas quebras ou paradas de manutenção pois o objetivo do trabalho não era analisar o comportamento do sistema kanban quando da existência deste tipo de problema. O desempenho destes tempos podem ser visualizados na figura 4-5.

O tempo ocupado corresponde ao tempo que o recurso está processando as peças e realizando *setup*. Com a redução do tamanho do lote, o tempo processando as peças praticamente não se alterou, pois a demanda de itens não foi modificada. O mesmo não aconteceu com o tempo despendido com o *setup*. Com a operação de

lotes menores, o tipo de peça produzida alternou-se com maior freqüência, fazendo com que o *setup* fosse realizado mais vezes aumentando o tempo gasto nesta atividade. Conseqüentemente, a ocupação média dos recursos produtivos aumentou com a redução do tamanho do lote, como pode ser verificado pelo gráfico da figura 4-5.

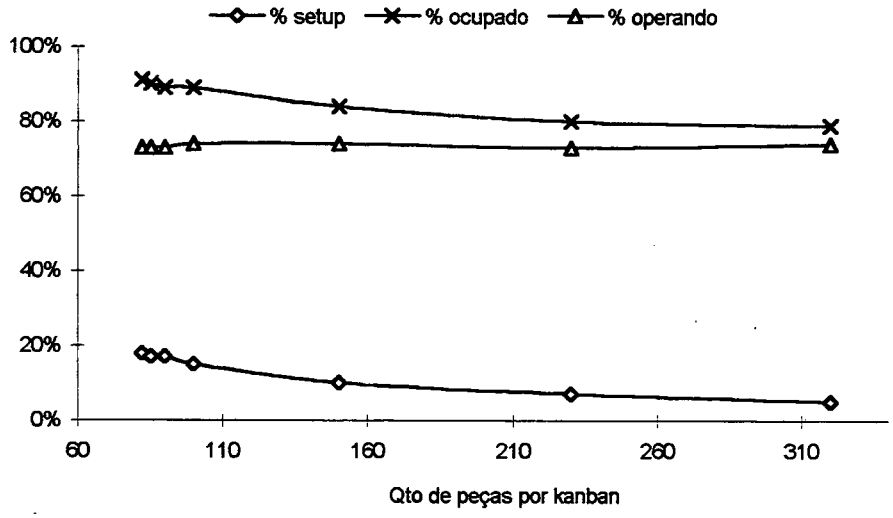


Figura 4-5 *Gráfico da média de utilização dos recursos produtivos em relação a variação da quantidade de peças por kanban - cenário 1.*

Como a metodologia proposta no capítulo 3 tem seu passo final com a saturação da taxa de utilização do recurso gargalo, o gráfico dos seus tempos de operação, *setup* e ocupação total é apresentado na figura 4-6. Pode-se notar que a medida em que os lotes ficam menores do que 100 unidades, há um aumento rápido na carga total deste recurso, em função do aumento do número de *setups*, levando-o a atingir o seu limite de produção com 82 peça por kanban.

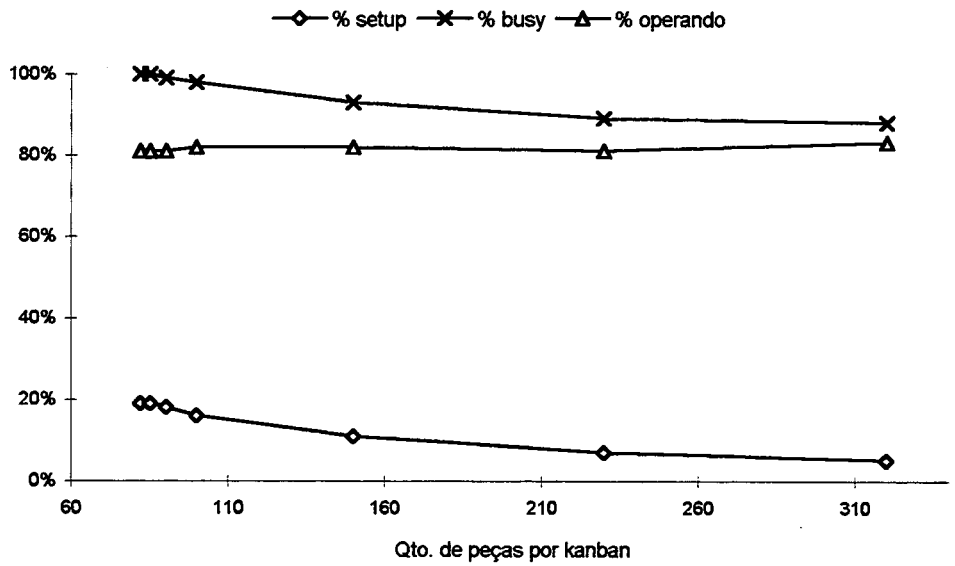


Figura 4-6 *Gráfico da utilização do recurso gargalo em relação a variação da quantidade de peças por kanban - cenário 1.*

Quando o recurso gargalo chega no seu limite produtivo, uma redução extra do tamanho do lote faz com que ocorram *backorders*, persistindo este problema mesmo com aumento do número de kanbans. Ou seja, pedidos não são atendidos em função da falta de estoque fazendo com que faltem itens na linha de montagem e o Plano Mestre de Produção não seja atingido.

4.2.2. Escolha da Faixa de Operação do Sistema Kanban no Cenário 1

Uma vez coletados os dados e analisados os desempenhos das diferentes composições do sistema kanban analisadas, cabe ao analista decidir pela composição de tamanho do lote e número de kanbans que traga maiores benefícios sob a ótica da filosofia JIT para o sistema de produção.

Em todas as alternativas analisadas a meta de atender a demanda foi cumprida. O que se pretende com a metodologia é dimensionar o sistema kanban (definir qual a composição de tamanho de lote e número de kanbans) que atende a demanda com maior flexibilidade e menores custos, para um dado cenário produtivo.

Neste sentido, com relação ao cenário 1 onde os tempos de *setup* são altos, encontrou-se que o *lead-time* de produção mínimo é alcançado com lotes de 100 unidades. Aumentando-se o tamanho do lotes, os *lead-times* de produção aumentam em função do aumento do tempo de processamento dos mesmos. Reduzindo-se o tamanho dos lotes, os *lead-times* de produção aumentam devido ao congestionamento dos recursos produtivos decorrente da realização mais freqüente de *setups* e do aumento do número de kanbans em circulação.

Para o estoque em processo, em cenários com *setups* altos, verificou-se que a necessidade de empregar lotes grandes para atender a demanda associado as regras para o funcionamento do sistema kanban, leva a baixos índices de rotatividade dos mesmos. A melhor alternativa neste caso foi para lotes com 82 unidades com percentual de kanbans cheios da ordem de 83%. O aparecimento de backorders, decorrentes da existência de gargalos no sistema produtivo, impediu a redução maior dos lotes e, teoricamente, redução do WIP.

O terceiro ponto analisado, a taxa de ocupação dos recursos produtivos, em particular do recurso gargalo, está diretamente relacionado com os tempos de *setups*. A medida que os tamanhos de lotes diminuíram a ocupação dos recursos aumentaram pelo aumento da quantidade de *setups* realizados. Dentro da ótica da filosofia JIT é interessante manter um certo tempo disponível nos recursos para absorver eventuais problemas que possam ocorrer sem afetar o sistema de "puxar" a produção. Sendo assim, não é aconselhável trabalhar com lotes muito pequenos que levam a existência de gargalos.

Como forma de apoiar a decisão de escolher a relação tamanho do lote e número de kanbans para um determinado cenário, pode-se montar um gráfico, apresentado na figura 4-7, com o percentual que uma determinada medida de desempenho (estoque médio, *lead-time* de produção e percentual de ociosidade do recurso gargalo) afasta-se do valor mínimo obtido para a faixa de tamanho do lote e número de kanbans analisada.

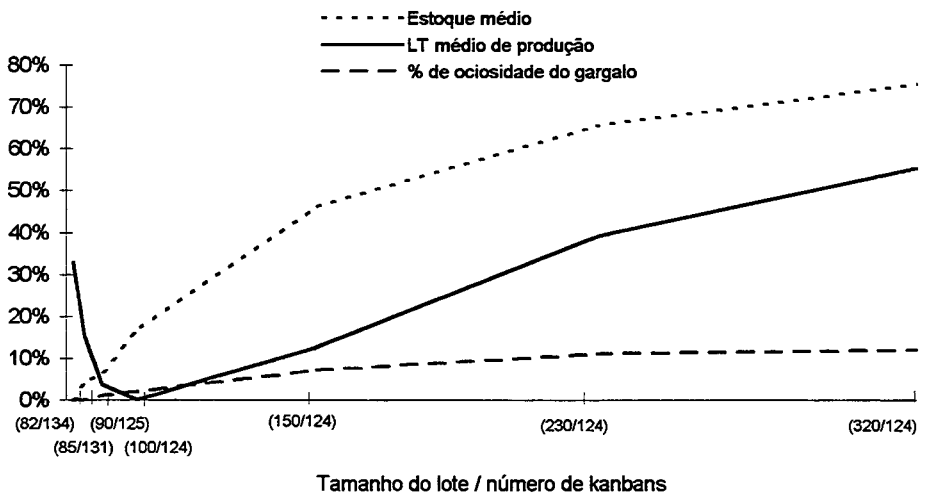


Figura 4-7 *Gráfico da variação percentual das medidas de desempenho em relação ao mínimo obtido pela aplicação da metodologia - cenário 1.*

Conforme pode ser visto neste gráfico, para o cenário 1 de *setups* altos, as combinações de (85/131), (90/125) e (100/124) estão dentro de uma faixa aceitável onde os *lead-times* de produção estão baixos, os estoques médios são pequenos e o recurso gargalo apresenta uma pequena ociosidade. Para efeito de comparação com os resultados obtidos no cenário 2 será escolhido como a melhor alternativa a combinação de lotes de 90 unidades com 125 kanbans no sistema.

A seguir serão apresentadas as considerações sobre a aplicação da metodologia para o cenário 2, onde os tempos de *setup* foram reduzidos.

4.3. APLICAÇÃO DA METODOLOGIA A FÁBRICA JIT COM AS CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO DO CENÁRIO 2

No cenário 2 todos os parâmetros do cenário 1 foram mantidos, a exceção dos tempos de *setup* dos recursos produtivos. Estes tempos foram reduzidos de uma média de 30 minutos para uma média de 3 minutos. Através do procedimento de aplicação da metodologia proposta, obteve-se um conjunto de dados pertinentes ao cenário 2.

O tamanho do lote inicial, obtido pelo passo 1 da metodologia, foi de 60 peças por kanban. Dando prosseguimento aos passos da metodologia, foi sendo

reduzido sistematicamente o tamanho do lote até o limite da capacidade do recurso gargalo em atender a demanda. O tamanho do lote foi reduzido até 5 peças por kanban, sendo apresentado na tabela 4-4 as composições de tamanho de lote e número de kanbans calculados para as quais o desempenho da fábrica JIT foi avaliado.

Qto. peças por kanban	*Num. total de kanbans*
5	545
7	370
10	264
15	201
30	139
60	139

Tabela 4-4 *Número total de kanbans calculado para cada tamanho de lote avaliado pela aplicação da metodologia - cenário 2.*

Como a faixa de tamanho do lote analisada não foi a mesma para ambos os cenários, os *lead-times* apresentaram características diversas em termos de valor e variabilidade. Assim, o tempo de execução da simulação empregado para obtenção de dados estatisticamente consistentes foi diferente para cada cenário analisado. Enquanto no cenário 1 foi necessário a simulação de 24 meses de produção, no cenário 2 foi suficiente a simulação de 3 meses de produção para se obter dados estatisticamente confiáveis.

Os resultados referentes as condições de operação com diferentes quantidades de peças por kanban foram agrupados em gráficos, apresentados e analisados a seguir.

4.3.1. Análise das Medidas de Desempenho do Cenário 2

A primeira medida de desempenho analisada neste cenário foi o *lead-time*. Na figura 4-8 apresenta-se o gráfico com os valores da média do *lead-time* médio de transporte das peças e da média dos *lead-time* máximo e médio de produção das peças processadas pelos três centros de trabalho. Neste gráfico, a barra de erro

corresponde ao intervalo de confiança máximo dentre os obtidos para os pontos plotados.

Neste gráfico observa-se que o *lead-time* de transporte se manteve praticamente constante, em torno de 1 hora e 30 minutos. Este comportamento era esperado, pois os parâmetros referentes ao sistema transportador não foram alterados e este teve capacidade de carga suficiente em todas as configurações do sistema kanban investigadas. Por outro lado, tanto o *lead-time* de produção médio como o máximo variaram com a alteração do tamanho do lote, apresentando um faixa de valores mínimos entre 10 a 20 peças por kanban.

É interessante avistar neste gráfico o fato de que, para a faixa de operação com lotes inferiores a 30 unidades, o *lead-time* de transporte foi maior que a média do *lead-time* máximo de produção das peças. Isto ocorreu em virtude do sistema transportador continuar com as mesmas características de operação do cenário 1, enquanto que os recursos produtivos tiveram uma melhoria com a redução do *setup*, o que permitiu que o sistema produtivo operassem com lotes menores.

Nesta faixa de operação, pelo fato do *lead-time* de transporte ter sido maior que a média do *lead-time* máximo de produção para algumas peças, o número de kanbans de movimentação foi maior que o de kanbans de produção. Assim, poderia ocorrer a situação em que o número de kanbans de movimentação no transportador fosse maior que o número de kanbans no supermercado de itens processados. Caso a quantidade de kanbans de movimentação transportados de uma só vez fosse maior que a quantidade de kanbans cheios nos supermercados de itens processados parte da demanda não seria suprida. Ou seja, faltariam contenedores cheios, anexados a kanbans de produção, para serem trocados por contenedores vazios, anexados aos kanbans de movimentação.

Não sendo suprida a demanda de kanbans de movimentação, os supermercados de matéria prima não seriam repostos em quantidade suficiente fazendo com que o fluxo produtivo não se mantivesse. Caso isto ocorresse, teria-se

escassez de itens nos supermercados da linha de montagem, e conseqüentemente o Plano Mestre de Produção não seria atingido, sendo esta uma condição de operação não otimizada.

Desta forma, para a faixa de operação com menos de 30 peças por kanban, o número de kanbans de produção que ajustaram o sistema kanban para que não faltassem itens foi maior que o calculado pela equação 3-1. Isto se deu porque este parâmetro foi sendo sistematicamente aumentado na etapa da metodologia de avaliação da fábrica JIT. Nesta etapa, a partir da indicação da MD6 (*backorder*), o número de kanbans foi sendo aumentado até que não ocorresse mais escassez de itens.

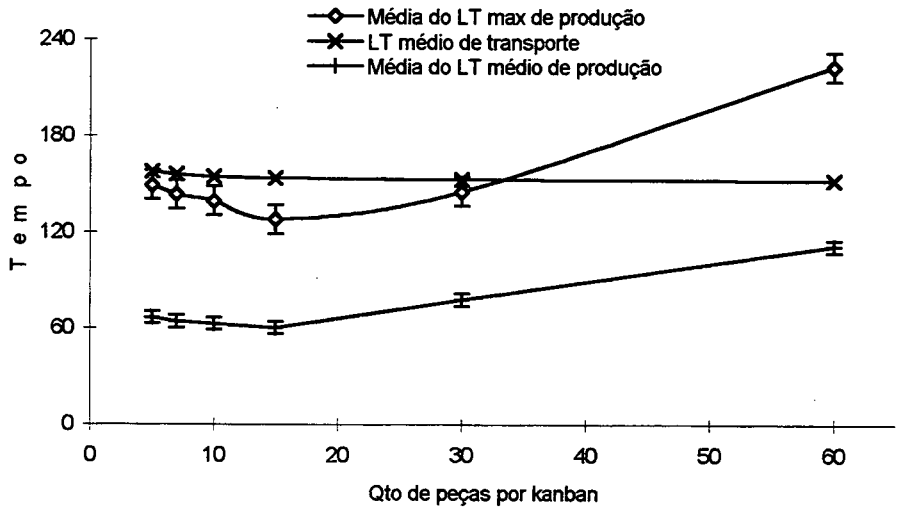


Figura 4-8 *Gráfico da variação dos valores do lead-time médio e máximo de produção e de transporte em relação a variação da quantidade de peças por kanban - cenário 2.*

Para o entendimento do mecanismo de variação do *lead-time* de produção em relação a variação do tamanho do lote, analisam-se os tempos que o compõe separadamente. Como já descrito, o *lead-time* de produção é constituído pelo tempo de *setup*, tempo de processamento e tempo de espera. No gráfico da figura 4-9 apresenta-se os valores destes tempos obtidos em cada uma das composições do sistema kanban avaliadas.

Verifica-se nesta figura que o tempo de *setup* permanece constante em toda a faixa avaliada, enquanto que o tempo de processamento, por ser proporcional a quantidade de peças por kanban, decresce com a redução deste parâmetro. Já o tempo de espera se manteve a princípio praticamente constante em relação a redução do tamanho do lote, aumentando a partir da redução dos lotes a quantidade inferior a 15 peças.

O tempo de espera depende do tempo de processamento e *setup* dos kanbans e da quantidade destes que são produzidos antes do kanban analisado. Em toda a faixa de operação analisada, com a redução do tamanho do lote, o tempo de processamento dos kanbans esperando para serem produzidos diminuiu. Em contrapartida, o número de kanbans esperando para serem produzidos aumentou, conseqüência do maior número de kanbans de produção e do congestionamento do sistema produtivo.

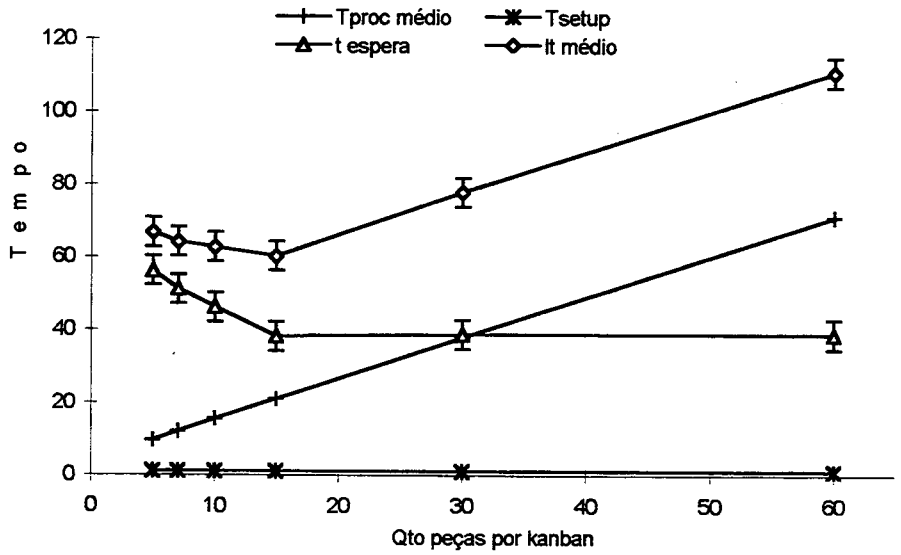


Figura 4-9 *Comportamento dos tempo que compõe o lead-time médio de produção em relação a variação da quantidade de peças por kanban - cenário 2.*

Assim, na faixa de operação entre 60 e 15 peças por kanban, estes parâmetros se equilibraram, fazendo com que o tempo de espera se mantivesse praticamente constante. Entretanto, a partir da redução do tamanho do lote a quantidades inferiores a 15 peças por kanban, o número de kanbans esperando para

serem produzidos aumentou numa magnitude maior que a redução do tempo de processamento dos kanbans. Conseqüentemente, o tempo de espera aumentou apesar da redução do tempo de processamento dos kanbans.

Desta forma, a medida em que o tamanho do lote se reduz, o tempo de processamento diminui, porém o tempo de espera se mantém constante até um ponto aumentando a seguir enquanto que o tempo de *setup* permanece constante, fazendo com que a curva do *lead-time* médio seguisse a tendência da soma destes tempos.

O *lead-time* máximo de produção se comportou de forma similar ao *lead-time* médio de produção. A diferença se deu pelo fato do tempo de espera máximo ser maior que o tempo de espera médio, tendo em vista a variação da quantidade de kanbans nas filas de espera dos recursos.

A partir destas observações pode-se concluir que no processo de dimensionamento do sistema kanban com *setups* baixos, lotes grandes levam a *lead-time* de produção altos devido ao seu próprio tempo de processamento, e lotes pequenos também levam a *lead-time* de produção altos devido ao congestionamento do sistema produtivo. O congestionamento do sistema produtivo acentuou-se pelo fato do número de kanbans de produção ter sido aumentado em função da influência do sistema transportador.

Os valores das medidas de desempenho 2 e 3, estoque em processo e percentual de kanbans cheios, deste cenário produtivo estão representados nos gráficos das figuras 4-9 e 4-10 respectivamente.

A partir do gráfico da figura 4-10 observa-se que a medida que o tamanho do lote foi sendo reduzido, o estoque máximo decresceu, entretanto a uma taxa cada vez menor. Até o ponto em que esta tendência foi revertida, aumentando o estoque máximo com a redução do tamanho do lote.

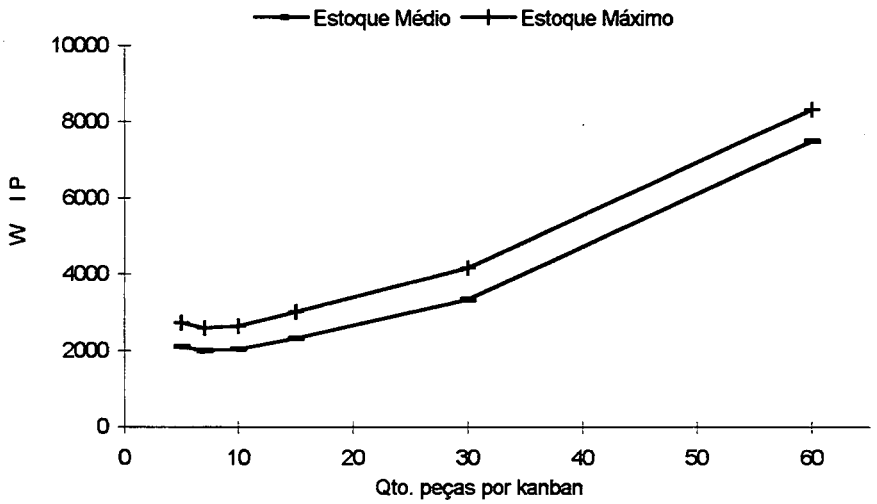


Figura 4-10 *Gráfico da variação do estoque máximo e médio em processo em relação a variação da quantidade de peças por kanban - cenário 2.*

O estoque máximo é determinado pela multiplicação do tamanho do lote pelo número de kanbans alocados no sistema produtivo. Neste cenário, com os tempos de *setup* dos recursos produtivos reduzidos, o número de kanbans calculados pela metodologia variou com a redução do tamanho do lote em toda a faixa analisada. Assim, a medida que foi sendo reduzido o tamanho dos lotes de produção a metodologia alocou uma quantidade maior de kanbans no sistema produtivo. Cabe salientar que o número de kanbans foi influenciado pelo sistema transportador na faixa de operação com lotes inferiores a 30 peças, sendo maior do que seria sem esta interação.

O estoque médio seguiu esta tendência sendo influenciado também pela quantidade média de kanbans cheios no sistema. Assim, a medida que o percentual de kanbans cheios reduziu, como pode ser verificado pelo gráfico da figura 4-11, o estoque médio se distanciou do estoque máximo.

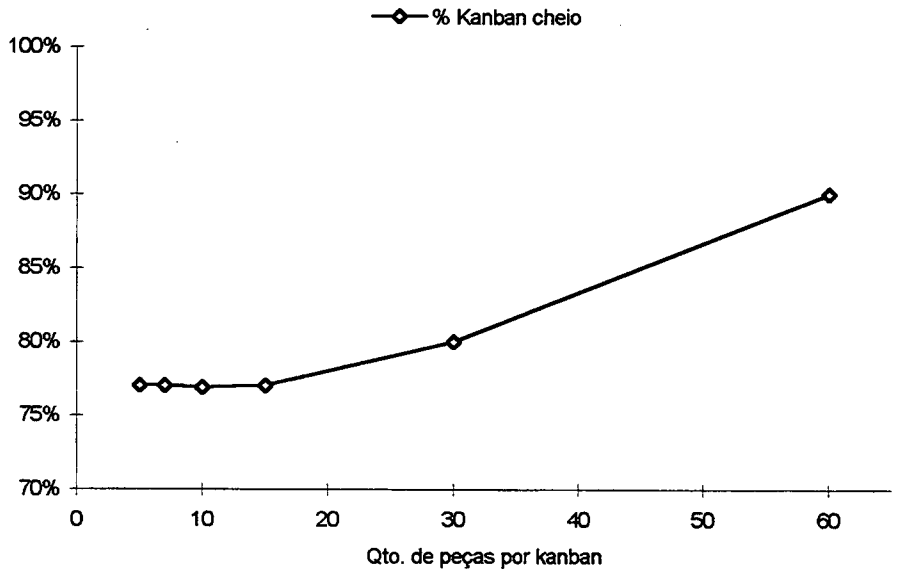


Figura 4-11 *Valores do percentual de kanbans cheios para os composições do sistema kanban avaliadas - cenário 2.*

Em função deste fatores, constata-se que neste cenário produtivo, com a redução do tamanho do lote o estoque máximo decresce até um mínimo aumentando a seguir. O estoque médio acompanha esta tendência distanciando-se do estoque máximo com a diminuição do percentual de kanbans cheios. Esta medida de desempenho se reduziu inicialmente, estabilizando-se na faixa de 77% para lotes inferiores a 15 unidades.

Outro ponto a ser investigado é a ocupação dos recursos produtivos. A variação da taxa de ocupação dos recursos para as diferentes composições do sistema kanban avaliadas são apresentada na figura 4-12. Como pode se verificar por este gráfico, neste cenário também ocorreu o aumento da taxa de ocupação dos recursos produtivos com a redução do tamanho dos lotes. Com lotes menores, maior foi a alternância do tipo de peça, aumentando o número de *setups* realizados e, como a taxa de operação se mantém constante, aumentando a taxa de ocupação dos recursos.

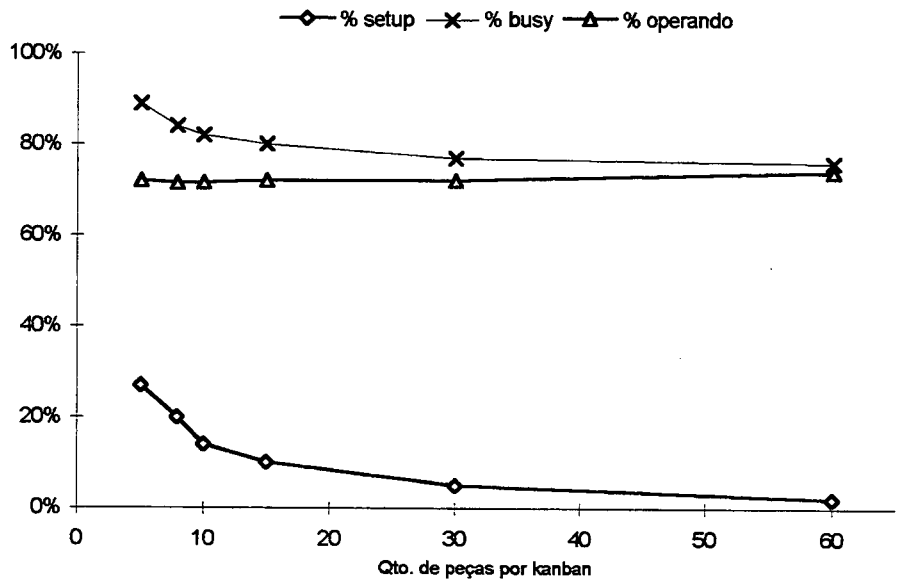


Figura 4-12 *Gráfico da média de utilização dos recursos produtivos em relação a variação da quantidade de peças por kanban - cenário 2.*

O mesmo se dá com o recurso gargalo, como pode ser verificado pela figura 4-13. Pode-se notar que o recurso gargalo atinge a saturação da sua capacidade com lotes de 5 unidades, indicando o ponto de parada da metodologia para este cenário.

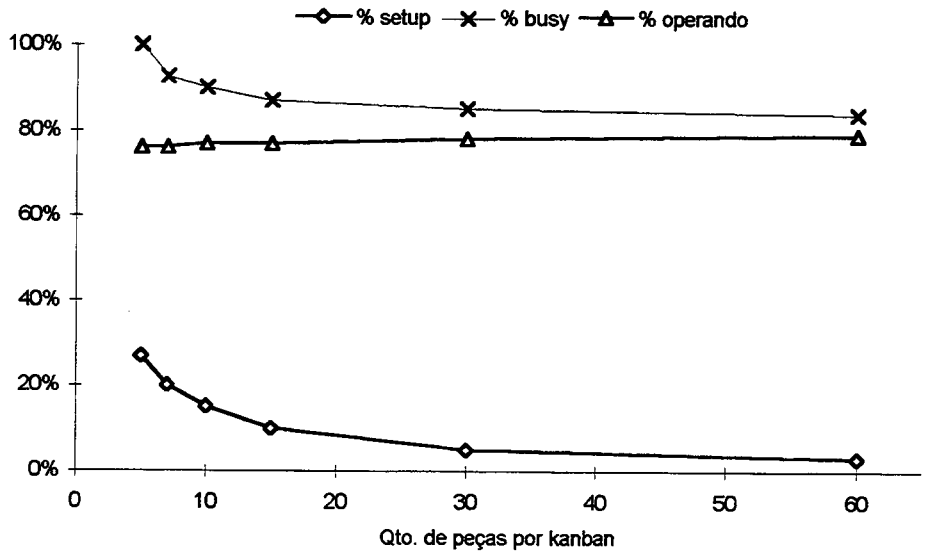


Figura 4-13 *Gráfico da utilização do recurso gargalo em relação a variação da quantidade de peças por kanban - cenário 2.*

A seguir, a partir dos resultados obtidos e da análise destes apresenta-se as considerações realizadas no processo de seleção da condição de operação do sistema kanban que resultem em melhor desempenho do sistema produtivo sob a ótica da filosofia JIT.

4.3.2. Escolha da Faixa de Operação do Sistema Kanban no Cenário 2

Conforme foi realizado para o cenário 1, ao final da metodologia obteve-se pares de tamanho de lote e número de kanbans que executam ao Plano Mestre de Produção sem esgotar o limite do recurso gargalo. Deve-se escolher qual a faixa de operação que melhor atende os objetivos do JIT neste cenário com tempos de *setup* baixos.

Com relação ao *lead-time* de produção médio, chegou-se praticamente as mesmas conclusões do cenário 1, ou seja, existe um ponto mínimo, que neste caso é obtido com lotes de 15 unidades e com 201 kanbans, que um vez ultrapassado leva a um aumento dos *lead-times* de produção em decorrência do aumento dos tempos de processamento. Por outro lado, reduzindo-se o tamanho dos lotes também ocorre aumento dos *lead-times* de produção em função do maior congestionamento do sistema produtivo, agravado pela questão já discutida, da necessidade do aumento do número de kanbans de produção em função do sistema transportador.

No que se refere ao estoque em processo ocorreram situações diversas das encontradas no cenário 1. Inicialmente não houve necessidade de aumentar o número de kanbans calculados (pela equação 3-1) em função das regras de operação do sistema kanban, fazendo com que o percentual de kanbans cheios caíssem rapidamente para valores abaixo de 80%. Contudo, devido a influência do *lead-time* alto de movimentação, para lotes com menos de 30 unidades, houve um aumento do número e kanbans de produção no sentido de equilibra-los aos kanbans

de movimentação, fazendo com que a curva do estoque médio revertesse sua tendência de queda a partir do ponto mínimo para lotes com 7 peças.

A variação da capacidade produtiva dos recursos neste cenário foi semelhante a ocorrido no cenário 1, onde a redução gradativa dos tamanhos do lotes levou a uma alternância maior no mix de produção e, conseqüentemente, no aumento do tempo total gasto com *setups*. O recurso gargalo foi completamente utilizado para lotes de 5 unidades, sendo esta uma política não desejada sob a ótica do JIT.

No sentido de apoiar a decisão da escolha da faixa ideal de operação do sistema kanban para este cenário, pode-se montar um gráfico, apresentado na figura 4-14, com o percentual que as medidas de desempenho se afastam do seus valores mínimos obtidos na faixa de tamanho de lotes e número de kanbans analisada.

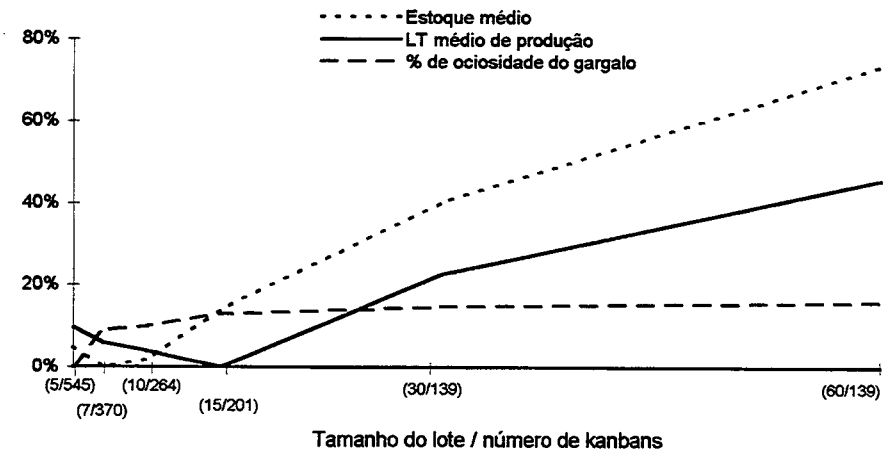


Figura 4-14 *Gráfico da variação percentual das medidas de desempenho em relação ao mínimo obtido pela aplicação da metodologia - cenário 2.*

Neste gráfico pode-se ver que as combinações de (7/370), (10/264) e (15/201) atendem os objetivos da filosofia JIT. Lotes de 7 unidades privilegiam a redução dos estoques, enquanto que lotes de 15 melhoram o desempenho do *lead-time* de produção. Para efeito de comparação com os resultados obtidos no cenário

1, será escolhido como melhor alternativa a combinação de lotes com 10 unidade com 264 kanbans.

A seguir, aproveitando-se os resultados obtidos das alternativas de combinações de tamanho de lote e número de kanban para os dois cenários produtivos, serão feitas algumas considerações sobre as vantagens em se reduzir os tempos de *setup* dentro da filosofia JIT.

4.4. COMPARAÇÃO DO DESEMPENHO DA FÁBRICA JIT ENTRE OS CENÁRIOS 1 E 2

Conforme discutido no capítulo 2, os objetivos operacionais da filosofia JIT no que tange à flexibilidade e redução de estoque estão diretamente relacionados com a fabricação e movimentação de pequenos lotes. A fabricação e movimentação de pequenos lotes só é possível com tempos baixos de *setup* e transporte.

Tendo em vista que a metodologia proposta para o dimensionamento do sistema kanban explora duas situações de produção distintas no que se refere aos *setups*, pode-se a partir da escolha da melhor alternativa de trabalho em cada cenário, fazer uma comparação das medidas de desempenho resultantes entre o sistema kanban com *setups* altos e baixos.

Na tabela 4-3 apresentam-se os resultados obtidos pela fábrica JIT para os dois cenários produtivos, com os tamanhos de lotes e número de kanbans selecionados como os mais adequados a partir da metodologia para dimensionamento do sistema kanban.

MD	Tamanho do lote	Número de kanbans	LT produção (minutos)		Estoque Médio	Ocupação Gargalo
			Médio	Máximo		
Cenário 1	90	125	279	691	9724	99%
Cenário 2	10	264	63	139	2031	90%
Redução %	---	---	***77%***	***80%***	***79%***	***9%***

Tabela 4-5: *Comparação entre as medidas de desempenho da Fábrica JIT com o sistema kanban ajustado com as condições de operação dos dois cenários.*

No cenário 1, onde os tempos médios de setup eram da ordem de 30 minutos, chegou-se a lotes de 90 unidades com 125 kanbans em circulação pelo sistema produtivo. Neste cenário e com estas condições de operação do sistema kanban, o lead-time de médio de produção foi de 279 minutos, chegando a um máximo de 691 minutos. Os estoques médio no sistema foram de 9.724 unidades, e a ocupação do recurso gargalo de 99% de sua capacidade produtiva.

No cenário 2, os tempos de setups foram reduzidos para um valor médio de 3 minutos, levando a metodologia proposta ao dimensionamento de lotes de 10 unidades com 264 kanbans em circulação pelo sistema produtivos. Conforma pode ser visto na tabela 4-3, o lead-time de produção médio caiu para 63 minutos, ficando 77% menor que o do cenário anterior e o lead-time máximo alcançou 139 minutos, reduzindo-se em 80%.

Os estoque médios também foram reduzidos nesta ordem de grandeza (79%), e passaram de 9724 para 2031 unidades com a redução do setup. Convém lembrar que o percentual de kanbans cheios ficou na ordem de 77%, garantindo a disponibilidade de estoques para os centros produtivos.

Além de todos estes benefícios, a taxa de ocupação do recurso gargalo para atender ao mesmo plano mestre de produção ficou em 90% com a redução do setup, ganhando-se com isto uma capacidade excedente para expandir a demanda e/ou tratar melhor dos problemas da produção.

Com estes resultados comparou-se a teoria formalizada pela filosofia JIT, de que a redução dos tempos de setup e conseguinte produção e movimentação de pequenos lotes, leva a ganhos de produtividade nos sistemas produtivos, com os resultados obtidos.

Outro ponto importante na teoria da filosofia JIT está relacionado com a maior facilidade em identificar os problemas produtivos quando os estoques são menores. No cenário 1, o tempo de ciclo do sistema transportador para a solução encontrada estava adequado. Porém com a redução dos tamanhos de lotes no

cenário 2, este tempo ficou subotimizado e se tornou responsável pelo maior parte do lead-time total do sistema. O próximo passo na melhoria do desempenho da fábrica JIT ficou bem claro, e seria o redimensionamento do transportador, reduzindo o seu tempo de ciclo. Contudo a análise desta melhoria não é objetivo do presente trabalho.

No capítulo seguinte serão feitas as considerações e recomendações resultantes da aplicação da metodologia proposta para o dimensionamento do sistema kanban.

CAPÍTULO V

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕS

5.1. CONSIDERAÇÕES SOBRE OS RESULTADOS OBTIDOS

Buscou-se neste trabalho desenvolver uma metodologia que ajusta os parâmetros do sistema kanban a partir da análise das medidas de desempenho do sistema produtivo obtidas para diferentes composições de tamanho do lote e número de kanbans. Pretendeu-se também avaliar a influência dos tempos de *setup* dos recursos produtivos no ajuste do sistema kanban, procurando-se determinar as condições em que os benefícios do sistema kanban são mais evidenciados.

Para tanto, na parte inicial do trabalho estudou-se como o problema foi abordado na bibliografia, através de pesquisa em livros e periódicos publicados recentemente sobre o assunto. Desta revisão bibliográfica verificou-se que a maioria destes trabalhos trata do JIT apenas de forma conceptual. Mesmos os trabalhos que abordam questões operacionais do sistema kanban apresentam resultados válidos para situações específicas, sendo de difícil extrapolação para

outros casos, sem tratar da questão da quantidade de peças por kanban e número de kanbans simultaneamente.

Desta forma, desenvolveu-se a metodologia proposta para o ajuste dos parâmetros do sistema kanban que proporcionasse melhores condições de operação de acordo com as metas do JIT. Pela aplicação da metodologia no ajuste do sistema kanban de uma fábrica JIT hipotética, modelada computacionalmente, estudou-se o comportamento do sistema produtivo em relação a diferentes condições de operação do sistema kanban. Pôde-se então analisar como o sistema de produtivo foi influenciado, e quais as penalidades ao sistema kanban caso as condições de operação do JIT não estivessem sendo compridas.

Na simulação computacional da fábrica JIT, foi desenvolvida uma estrutura para simulação do JIT com o fluxo e sequenciamento de material sendo gerenciado pelo sistema kanban. A lógica de programação do sistema kanban foi externa ao resto da lógica dos servidores, podendo ser aplicada para a simulação de sistemas JIT operando com características diversas das utilizadas no presente trabalho.

A metodologia desenvolvida teve como princípio básico de funcionamento dois *loppings*. No *lopping* externo, partindo-se de um lote grande, reduziu-se a quantidade de peças do lote de produção, sendo o número de kanbans calculado para esta condição no *lopping* interno. O limite de redução do tamanho do lote foi indicado pelo esgotamento da capacidade produtivo do recurso gargalo. Com a exaustão da capacidade do recurso gargalo, as composições de tamanho de lote e número de kanbans foram analisadas através das medidas de desempenho obtidas, inferindo-se sobre a faixa de operação que trouxesse maiores benefícios sobre a ótica da filosofia JIT.

Aplicando-se a metodologia ao modelo computacional da fabrica JIT operando com dois cenários produtivos diferentes, um com tempos de *setup* alto e outro com tempos baixos, verificou-se o efeito da redução do *setup* sobre o comportamento do sistema produtivo.

Verificou-se a importância de *setups* baixos para a operação do sistema kanban com lotes pequenos e quais as penalidades ao sistema kanban caso os tempos de *setup* fossem altos. Por esta razão, pode-se afirmar que tempos de *setup* baixos são um requisito teórico para que o sistema kanban opere corretamente e contribua no enfoque de melhoria contínua do JIT.

Outro fato interessante que surgiu no decorrer da pesquisa foi a comprovação de que melhorias na operação individual dos recursos não implicam necessariamente em melhorias no processo, como descrito por Shingo [Shingo 96]. Isto se dá pelo fato do sistema produtivo ser integrado em sistemas de produção puxada. Assim, a operacionalização do JIT exige que as várias partes do sistema produtivo estejam coordenados. Isto quer dizer que melhorias em um do subsistemas do sistema produtivo, podem não resultar em melhorias no desempenho global do sistema produtivo, caso os outros subsistemas não tenham capacidade de acompanhar este aumento na eficiência.

Este fato foi comprovado quando no cenário 2 reduziu-se o tempo de *setup*, porém não alterou-se o tempo de ciclo do sistema transportador, fazendo com que o mesmo passasse a atuar de forma limitante no sistema produtivo.

A metodologia proposta permitiu através do cálculo das medidas de desempenho, identificar tais fatos e possibilitar a atuação sobre eles. Contudo, não era objetivo deste trabalho explorar todas as alternativas de soluções para os potenciais ganhos dos sistemas JIT. A seguir é apresentada uma lista de sugestões que poderão ampliar os resultados obtidos com este trabalho.

5.2. SUGESTÕES PARA ESTUDO POSTERIORES

Considerando-se o enfoque deste trabalho, e as simplificações realizadas para possibilitar a análise do sistema kanban, cabe fazer algumas recomendações para futuros trabalhos de pesquisa nesta área, tais como:

- Aplicar a metodologia de ajuste do sistema kanban em uma empresa para verificação dos resultados em um caso real, validando a sua eficácia bem como suas limitações práticas.

- Verificar a influência da determinação dos níveis do quadro de kanbans dado que eles determinam quando será alterado o tipo de peça a ser produzida e, conseqüentemente, afetam a quantidade de *setups* realizados.

- Estudar a influência no sistema kanban de melhorias no transporte de peças, permanecendo constante as outras características do sistema produtivo. Isto deve trazer resultados interessantes quanto a questão do balanceamento da eficiência dos vários subsistemas que compõe o sistema produtivo.

- Analisar como proceder com a variação da demanda em relação ao ajuste do sistema kanban. Neste trabalho, verificou-se que com o aumento do tamanho do lote diminuiu-se a ocupação dos centros de trabalho. Este comportamento é mais acentuado quando os tempos de *setup* são maiores. Seria interessante verificar, para diferentes tempos de *setup*, como deve ser reajustado o sistema kanban com o aumento da demanda.

- Estudar como a metodologia poderia ser adaptada para tratar de lotes de tamanhos diferentes para as diferentes peças, visto que neste trabalho levou-se em consideração que os lotes seriam todos de um mesmo tamanho.

6. Bibliografia

[Arai 89] ARAI, SEYU. ARABAN - O Princípio das Técnicas Japonesas de Produção: Qualidade - Custo - Prazo de Entrega. São Paulo, IMAM, 1989.

[Aytug 96] AYTUG, H., DOGAN, C. A., BEZMEZ, G., Determining the Number of Kanbans: a Simulation Metamodeling Approach. *Simulation*, Vol 67, No. 1, pp 23-32, 1996.

[Banks 96] BANKS, J., NORMAN, V. Simulation of Manufacturing ans Material Handling Systems. *Seminário apresentado no 16º ENEGEP*, Piracicaba, 1996.

[Bard 91] BARD, J. F., GOLANY, B. Determining the Number of Kanbans in a Multiproduct. Multistage Production System. *International Journal of Operation Research*, Vol. 29, No. 5, pp 881-895, 1991.

[Chu 92] CHU, C. , SHIH, W. Simulation Studies in JIT Production. *International Journal of Production Research*, Vol 30, No.11, pp 2573-2586, 1992.

[Changchit 88] CHANGCHIT, C., KUNG, H. Effect of Learning in JIT Production System: a Simulation Experiment in Microcomputer. *Computer and Idustrial Engineering*, Vol. 15, pp 172-178, 1988.

[Chuaddhury 90] CHUADDHURY, A., WHINSTON, A. B. Towards an Adaptative Kanban System. *International Journal of Operationa Research*, Vol. 28, No. 3, pp 437-458, 1990.

[Co 94] CO, C. H., JACOBSON, S. H. The Kanban Assignment Problem in Serial Just-in-Time Production System. *IEE Transaction*, Vol. 26, No. 2, pp 76-85, 1994.

[Corrêa 93] CORRÊA, HENRIQUE, GIANESI, IRINEU. *Just in Time, MRPII e OPT - Um enfoque estratégico*. São Paulo, Atlas, 1993.

[Costa 91] COSTA, MOACIR LISBOA. *Como imitar os japoneses e crescer (sem frescuras)*. Forianópolis, EDEME, 1991.

[Davis 87] DAVIS, J. W., STUBITZ, S. J. Configuring a Kanban System Using a Discrete Optimization of Multiple Stochastic Reponses. *International Journal of Operation Research*, Vol 25, No 5, pp 721-740, 1987.

[Ekere 89] EKERE, N. N., HANNAM, R. G. An Evaluation of Approaches to Modelling and Simulating Manufacturing Systems. *International Jouranl of Operation Research*, Vol 27, No 4, pp 599-611, 1989.

[Frein 95] FREIN, Y., MASCOLO, M. D., DALLERY, Y. On the Design of Generalized Kanban Control Systems. *International Journal of Operation & Production Management*, Vol. 15, No. 9, pp 158-184, 1995.

[Freitas 94] FREITAS, P. J. Um sistema Inteligente de Simulação para a Avaliação de Desempenho Operacional de Sistemas Flexíveis de Manufatura. *Tese Doutorado apresentada à Universidade Federal de Santa Catarina*, 1994.

[Fukukawa 93] FUKUKAWA, T., HONG, S. The Determination of the Optimal Number of Kanbans in a Just-in-Time Production System. *Computers Ind. Engineering*, Vol 24, pp 551-559, 1993.

[Golhar 91] GOLHAR, Y. D., STAMM, C. L. The Just-in-Time Philosophy: A Literature Review. *International Journal of Operationa Research*, Vol. 29, No. 4, pp 657-676, 1991.

[Gupta 89] GUPTA, Y. P., GUPTA, M. C. A System Dynamics Model for a Multi-Stage Multi-Line Dual-Card JIT-Kanban System. *International Journal of Operation Research*, Vol 27, No 2 pp 309-352, 1989.

[Hall 88] HALL, ROBERT W. *Excelencia na Manufatura.* São Paulo, IMAM, 1988.

[Harmon 91] HARMON, R. L. *Reinventando a Fábrica: Conceitos Modernos de Produtividade Aplicados na Prática.* Rio de Janeiro: Campus, 1991.

[Harmon 93] HARMON, R. L. *Reinventando a Fábrica II: Conceitos Modernos de Produtividade Aplicados na Prática.* Rio de Janeiro: Campus, 1993.

[Li 91] LI, A., CO, H. C. A Dynamic Programming Model for the Kanban Assignment Problem in a Multistage multiperiod Production System. *International Journal of Operationa Research*, Vol. 29, No. 1, pp 1-16, 1991.

[Lubben 89] LUBBEN, RICHARD T. *Just-In-Time - Uma Estratégia Avancada de Produção.* São Paulo, MacGraw-Hill, 1989.

[Mascolo 96] MASCOLO, M. DI. Analysis of a Synchronization Station for the Performance Evaluation of a Kanban System With a General Arrival Process of Demands. *European Journal of Operation Research* 89, 147-163, 1996.

[Mejabi 92] MEJABI, O., WASSERMAN, G. S. Simulation Constructs for JIT Modelling. *International Journal of Operation Research*, Vol 30, No 5, pp 1119-1135, 1992.

[Moura 89] MOURA, REINALDO A. *KANBAN, a Simplicidade do Controle da Produção.* São Paulo, IMAM, 1989.

[Monden 84] MONDEN, Y. *Sistema Toyota de Produção.* São Paulo: IMAN, 1984.

[Muckstadt 95] MUCKSTADT, J. A., TAYUR, S. R. A comparison of alternative kanban control mechanisms. I. Background and structural results. *IEE Transactions*, Vol. 27, pp 140-150, 1995.

[Muralidhar 92] MURALIDHAR, K., SWENSETH, S. R., Wilson, L. R. Describing Processing Time When Simulating JIT Environments. *International Journal of Operationa Research*, Vol 30, No. 1, pp 1-11, 1992.

[Pegden 95] PEGDEN, D. C., SHANNON, R. E., SADOWSKI, R. P. *Introduction to Simulation Using SIMAN*. 2 ed., New Jersey: McGraw-Hill, 1995.

[Pires 95] PIRES, L. G. R. Estudo do Sistema de Planejamento dos Recursos de Manufatura (MRPII) Através de suas Principais Variáveis. *Dissertação de Mestrado Apresentada à Politécnica da Universidade de São Paulo*, São Paulo, 1995.

[Philipoom 90] PHILIPOOM, P. R., REES, L. P., TAYLOR, B. W., HUANG, P. Y. A Mathematical Programming Approach for Determining Workcentre Lotsize in a Just-in-Time System With Signal Kanban. *International Jouranl of Operation Research*, Vol 28, No 1, pp 1-15, 1990.

[Pouraghabagher 96] POURAGHABAGHER, R. Implementation Challenges of MRP and JIT Manufacturing Systems. *Seminário apresentado no 16º ENEGEP*, Piracicaba, 1996.

[Price 94] PRICE, W., GRAVEL, M., NSAKANDA, L. A., A Review of Optimisation Models of Kanban-Based Production Systems. *European Journal of Operation Research*, Vol. 75, pp 1-12, 1994.

[Rees 87] REES, L. P., PHILIPOOM, P. R., TAYLOR, B. W., HUANG, P. Y. Dynamically Adjusting the Number of Kanbans in a Just-in-Time Production System Using Estimated Values of Lead Time. *IEE Transactions*, Vol. 19, pp 199-207, 1987.

[Sarker 89] SARKER, B. R., Simulating a Just-in-Time Production System. *Computers Industrial Engineering*, Vol. 16, No. 1, pp 127-131, 1989.

[Savsar 95] SAVSAR, M., AL-JAWINI, A., Simulation Analysis of Just-in-Time Production Systems. *International Journal of Production Economics*, Vol. 42, pp 67-78, 1995.

[Shingo 96a] SHINGO, S. *O Sistema Toyota de Produção do Ponto de Vista da Engenharia de Produção*. Porto Alegre: 2 ed., Artes Médicas, 1996.

[Shingo 96b] SHINGO, S. Sistemas de Produção com Estoques Zero: *O Sistema Shingo para Melhorias Contínuas*. Porto Alegre: Artes Médicas, 1996.

[Schonberger 88] SCHONBERGER, R. *Fabricação Classe Universal: as Lições de Simplicidade Aplicadas*. São Paulo: Pioneira, 1988.

[Schonberger 93] SCHONBERGER, R. *Técnicas Industriais Japonesas: Nove Lições Ocultas Sobre a Simplicidade*. 4 ed., São Paulo: Pioneira, 1993.

[Takahashi 96] TAKAHASHI, K., NAKAMURA, K., OHASHI, K. Order Release in JIT Production Systems: A Simulation Study. *Simulation*, Vol. 66, pp 75-87, 1996.

[Takahashi 94] TAKAHASHI, K. Determining the Number of Kanbans for Unbalanced Serial Production Systems. *Computers Ind. Engineering*, Vol 27, pp 213-216, 1994.

[Tubino 96] TUBINO, D. F., DANNI, T. S. Avaliação Operacional no Ambiente Just-in-Time. *16º ENEGEP*, Piracicaba, 1996.

[Villeda 88] VILLEDA, R., DUDEK, R., SMITH, M. L., Increasing the Production Rate of Just-in-Time Production System With Variable Operation Times. *International Journal of Operationa Research*, Vol. 26, No. 11, pp 1749-1768, 1988.

[Yan 95] YAN, H. The Optimal Number of Kanbans in a Manufacturing System With General Machine Breakdowns and Stochastic Demands. *International Journal of Operation & Production Management*, Vol. 15, No. 9, pp 89-103, 1995.

[Yanagawa 94] YANAGAWA, Y., MIYAZAKI, S. An Optimal Operation Planning for the Fixed Quantity Withdrawal Kanban System with Variable Leadtimes. *International Journal of Production Economics*, Vol. 33, pp 163-168, 1994.

[Wang 90] WANG, H., WANG, H. B. Determining the number of kanbans: a step toward non-stock-production. *International Journal of Operation Research*, Vol. 28, No. 11, pp 2101-2115, 1990.

[Welgama 95] WELGAMA, P. S., MILLS, R. G. H., Use of Simulation in the Design of a JIT System. *International Journal of Operation & Production Management*, Vol. 15, No. 9, pp 245-260, 1995.

[Womack 92] WOMACK, JAMES P. ET ALLI. *A Máquina Que Mudou o Mundo*. Rio de Janeiro, Campus, 1992.