

LUIZ GUILHERME SANDRINI

**O *TRADE-OFF* ENTRE OS *BUFFERS* DE CAPACIDADE DE
PRODUÇÃO E DE ESTOQUE**

São Paulo

2009

LUIZ GUILHERME SANDRINI

**O *TRADE-OFF* ENTRE OS *BUFFERS* DE CAPACIDADE DE
PRODUÇÃO E DE ESTOQUE**

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo para obtenção do título de
Mestre em Engenharia

São Paulo

2009

LUIZ GUILHERME SANDRINI

**O *TRADE-OFF* ENTRE OS *BUFFERS* DE CAPACIDADE DE
PRODUÇÃO E DE ESTOQUE**

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo para obtenção do título de
Mestre em Engenharia

Área de concentração:
Engenharia de Produção

Orientador:
Prof. Dr. Marco Aurélio de Mesquita

São Paulo

2009

Este exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, 21 de setembro de 2009.

Assinatura do autor _____

Assinatura do orientador _____

FICHA CATALOGRÁFICA

Sandrini, Luiz Guilherme

O trade-off entre os buffers de capacidade de produção e de estoque / L.G. Sandrini. -- ed.rev.-- São Paulo, 2009.

144 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Produção.

1. Estoques 2. Administração de estoques 3. Simulação I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Produção II. t.

DEDICATÓRIA

A Michelle e a meus pais, Aloir e Tere.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Marco Aurélio de Mesquita, por toda orientação e grande paciência durante o desenvolvimento deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Rui Botter, por sua contribuição durante a etapa de qualificação.

Ao Prof. Dr. Dario Miyake, por sua participação na etapa de qualificação e por suas observações.

A minha amada esposa Michelle, por tudo, e por ser a pessoa que mais incentivou a conclusão deste projeto.

A Fábio Cardoso, Igor Lopes, Alexandre Cunha e Christianne Busso, pelas preciosas opiniões dadas ao longo do caminho, e especialmente, amizade.

Ao time da Tática Lean Consulting, por estimular e facilitar a realização deste projeto.

A meus pais, Aloir e Teresinha, por seu cuidado e incentivo em todas as etapas até aqui, e certamente nas próximas.

Aos meus irmãos e aos muitos amigos, que colaboraram em orações.

A todos os que auxiliaram de alguma forma, mas que não foram citados aqui.

E por fim, ao Senhor Deus, por deixar claro suas intenções e por mais esta obra que Ele realizou.

RESUMO

Este trabalho propõe um método de análise do *trade-off* entre o *buffer* de capacidade de produção e o *buffer* de estoque, necessários para garantir o bom desempenho de um sistema sujeito a variações de demanda. A análise envolve a definição de um sistema de produção e a construção de um modelo de simulação. A simulação é realizada num sistema formado por uma única estação de trabalho, com mix de 10 produtos, controlados por um sistema kanban, que é considerado por muitos autores inadequado para operar em ambientes cuja demanda não é estável. Os resultados mostram que o *buffer* de capacidade proporciona vantagens operacionais e de custo ainda que sujeito a maiores níveis de variação de demanda.

Palavras-chave: *Buffer*, Capacidade; Estoque; Kanban; Simulação.

ABSTRACT

This research proposes a method to analyze the trade-off between the production capacity buffer and the inventory buffer, required to guarantee high performance levels in a system with demand variation. The analysis involves a production system delineation and the development of a simulation model. The system simulated is a single-stage production system, with mix of ten products, controlled by a kanban system, which is classified by several authors as not recommended in environments with unstable demand. The results indicate that the production capacity buffer enables operational and cost advantages, even if the production system is under higher demand variation.

Keywords: Buffer; Capacity; Inventory; Kanban; Simulation.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 - Retorno do cartão kanban de produção à caixa de coleta e ao quadro.....	21
Figura 2.2 - Reposição do supermercado e devolução do kanban de produção para junto do produto.....	21
Figura 2.3 - Devolução do kanban de retirada para a caixa de coleta de cartões.....	22
Figura 2.4 - Substituição do kanban de produção pelo kanban de retirada e transferência do material para o supermercado do cliente.....	23
Figura 2.5 - Retorno do kanban de produção ao quadro e reabastecimento do supermercado do fornecedor.....	23
Figura 2.6 - Procedimento de utilização de um quadro kanban com 3 cores	27
Figura 2.7 - Exemplo de quadro kanban.....	28
Figura 2.8 - Lógica da análise de capacidade que define a quantidade de setups possível num período.....	29
Figura 2.9 - Processos de chegadas ou partida com baixa e alta variação.....	36
Figura 2.10 - Representação gráfica dos custos totais, de estoque e dos pedidos.....	40
Figura 2.11 - Triângulo de gestão de processo.....	41
Figura 2.12 - Adaptação do triangulo de gestão de processos.....	41

Figura 2.13 - Configuração para dois produtos num sistema de manufatura de estágio simples (single stage).....	43
Figura 4.1 – Sistema considerado na simulação.....	50
Figura 4.2 - Definição da demanda – distribuição triangular simétrica.....	52
Figura 4.3 – Módulo de geração e atendimento da demanda.....	69
Figura 4.4 - Processo de produção e reposição dos estoques.....	72
Figura 4.5 - Demandas diárias do produto A, quando não existe variação de demanda, ou quando a variação é de 20%.....	76
Figura 4.6 - Demandas diárias do produto A, quando existe variação de 20% e 40%.....	77
Figura 4.7 - Número de containers do produto A pedidos ao fornecedor diariamente, considerando variação de demanda de 20% e 40%.	78
Figura 4.8 - Estoques do produto A medidos ao final de cada dia, considerando variação de demanda de 20% e ausência de variação de demanda.....	79
Figura 4.9 - Estoques totais do sistema medidos diariamente, sujeitos a variação de demanda de 20% e 40%.....	80
Figura 4.10 - Estoques totais medidos diariamente, sob diferentes níveis de capacidade da estação de trabalho.....	81
Figura 5.1 - Gráfico do nível de estoque x capacidade de produção considerando variação de demanda de 10%.....	92
Figura 5.2 - Gráfico do nível de estoque x capacidade de produção considerando variação de demanda de 20%.....	93

Figura 5.3 - Gráfico do nível de estoque x capacidade de produção considerando variação de demanda de 30%.....	94
Figura 5.4 - Gráfico do nível de estoque x capacidade de produção considerando variação de demanda de 40%.....	94
Figura 5.5 - Preenchimento dos estoques considerando diferentes níveis de variação de demanda.....	95
Figura 5.6 - Gráfico do estoque x variação de demanda, considerando a capacidade de produção de 1600 peças por dia (utilização 100%).....	96
Figura 5.7 - Gráfico do estoque x variação de demanda, considerando a capacidade de produção de 1667 peças por dia (utilização 96%).....	97
Figura 5.8 - Gráfico do estoque x variação de demanda, considerando a capacidade de produção de 1739 peças por dia (utilização 92%).....	98
Figura 5.9 - Gráfico do estoque x variação de demanda, considerando a capacidade de produção de 1818 peças por dia (utilização 88%).....	98
Figura 5.10 - Gráfico do estoque x variação de demanda, considerando a capacidade de produção de 1905 peças por dia (utilização 84%).....	99
Figura 5.11 - Gráfico do estoque x variação de demanda, considerando a capacidade de produção de 2000 peças	

por dia (utilização 80%).....	99
Figura 5.12 - Gráfico do estoque x variação de demanda, considerando a capacidade de produção de 2105 peças por dia (utilização 76%).....	100
Figura 5.13 - Gráfico do preenchimento dos estoques x variação de demanda para todos os níveis de capacidade de produção.....	101
Figura 5.14 - Gráfico da média de dias com horas extras x variação de demanda, considerando capacidade de produção de 1600 peças (utilização 100%).....	102
Figura 5.15 - Gráfico dos custos totais para cada um dos cenários simulados.	104
Figura 5.16 - Custo total e custo para cada componente para os cenários em que não existe variação de demanda.....	105
Figura 5.17 - Custo total e custo para cada componente em cenários com variação de demanda de 10%.....	106
Figura 5.18 - Custo total e custo para cada componente em cenários com variação de demanda de 20%.....	107
Figura 5.19 - Custo total e custo para cada componente em cenários com variação de demanda de 30%.....	108
Figura 5.20 - Custo total e custo para cada componente em cenários com variação de demanda de 40%.....	108
Figura 5.21 - Participação do custo de estoque no custo total da operação para cada um dos cenários para todos os níveis de variação de demanda.....	109

Figura 5.22 - Custos totais para cada um dos cenários considerando custo de manutenção de estoque de \$ 0,01 / peça / dia.....	111
Figura 5.23 - Custos totais para cada um dos cenários considerando custo de manutenção de estoque mais significativo em relação ao custo de produção.....	113

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 – Demanda diária média de cada produto.....	53
Tabela 4.2 - Níveis de utilização da capacidade previstos no experimento....	56
Tabela 4.3 - Capacidade média de produção da estação de trabalho em cada cenário a ser simulado.....	57
Tabela 4.4 - Tempos de ciclo por peça e por container para cada nível de utilização.....	58
Tabela 4.5 - Análise de capacidade para definição da faixa verde.....	61
Tabela 4.6 - Dimensionamento da faixa verde para todos os produtos.....	62
Tabela 4.7 - Dimensionamento da faixa amarela para todos os produtos.....	63
Tabela 4.8 - Dimensionamento da faixa vermelha para todos os produtos....	64
Tabela 4.9 - Estoque total para todos os produtos, de acordo com dimensionamento realizado.....	64
Tabela 4.10 -Situação inicial do nível dos estoques.....	65
Tabela 4.11 -Dimensionamento dos estoques ligeiramente superior a situação inicial.....	66
Tabela 4.12 -Dimensionamento dos estoques ilustrando o uso da faixa vermelha.....	67
Tabela 5.1 - Cenários a serem simulados durante o experimento.....	84
Tabela 5.2 - Custo de produção por hora considerando diferentes níveis de capacidade.....	88

Tabela 5.3 – Custos de estoque considerados na análise de custo.....	88
Tabela 5.4 - Parâmetros e resultados de cada um dos cenários simulados.	90
Tabela 5.5 - Estoque de cada produto nas situações em que o estoque total é de 1600 peças.....	91
Tabela 5.6 - Estoque de cada produto nas situações em que o estoque total é de 2000 peças.....	91
Tabela 5.7 - Custos totais e por componentes para cada um dos cenários simulados.....	103
Tabela 5.8 - Custos totais e por componentes para cada um dos cenários simulados quando o custo de estoque é de \$0,01 / peça / dia...	110
Tabela 5.9 - Custos totais e por componentes para cada um dos cenários simulados quando o custo de estoque é de \$1,0 / peça / dia.....	112

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	17
1.1 DELINEAMENTO DO TRABALHO.....	18
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	19
2.1 SISTEMA KANBAN.....	19
2.1.1 Sistema Kanban de um cartão.....	20
2.1.2 Sistema Kanban de dois cartões.....	22
2.1.3 Regras de funcionamento.....	24
2.1.4 Métodos de dimensionamento de cartões.....	25
2.1.5 Condições para utilização do Sistema Kanban.....	32
2.2 VARIABILIDADE.....	34
2.2.1 Variabilidade e fontes de variação.....	34
2.2.2 Variabilidade e impacto nos sistemas.....	36
2.2.3 Buffers.....	37
2.2.4 Utilização dos buffers de capacidade e estoque.....	39
3 MÉTODO DE PESQUISA.....	45
3.1 OBJETIVO DA PESQUISA.....	45
3.2 MÉTODO DE REALIZAÇÃO DA PESQUISA.....	46
3.3 DESENVOLVIMENTO DO MODELO DE SIMULAÇÃO.....	47
4 MODELAGEM.....	49
4.1 DESCRIÇÃO DO SISTEMA.....	49

4.1.1 Visão geral do sistema.....	49
4.1.2 Geração da demanda.....	51
4.1.3 Colocação e atendimento dos pedidos.....	53
4.1.4 Definição da capacidade de produção da estação de trabalho.....	55
4.1.5 Sequenciamento da produção e reposição dos estoques.....	58
4.1.6 Dimensionamento da quantidade de kanbans.....	60
4.2 LÓGICA DO MODELO DE SIMULAÇÃO.....	68
4.2.1 Geração da demanda e atendimento dos pedidos.....	68
4.2.2 Produção e reposição dos estoques.....	69
4.3 VALIDAÇÃO DO MODELO.....	73
5 RESULTADOS.....	72
5.1 PLANEJAMENTO DOS EXPERIMENTOS.....	82
5.1.1 Definição dos cenários simulados.....	82
5.1.2 Método de análise dos resultados.....	85
5.1.3 Método de análise de custo.....	86
5.2 ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	89
5.3 ANÁLISE DOS CUSTOS.....	102
6 CONCLUSÕES.....	114
REFERÊNCIAS.....	116
APÊNDICE A – Implementação do modelo no software Arena	119

1. INTRODUÇÃO

Muitos são os desafios a que as empresas ligadas a atividade de manufatura estão sujeitos atualmente, dentre os quais se destaca a grande concorrência no mercado interno e no mercado global. Um segundo grande desafio é oferecer um elevado mix de produtos aos clientes de forma eficiente, em mercados cujo número de aplicações aumenta constantemente.

Um grande número de métodos e abordagens para a melhoria no desempenho dos sistemas está disponível, dentre os quais o *Just-in-time*, ou de forma mais abrangente, o sistema de Manufatura Enxuta (ou *Lean Manufacturing*), cujo foco é a eliminação de desperdícios das operações e a melhoria do fluxo de produção. Estes objetivos são atingidos utilizando-se inúmeras ferramentas, tais como células de manufatura, gestão visual, padronização das atividades, sistema kanban, etc.

Hopp e Spearman (2001) afirmam que a redução da variabilidade é um tema central na melhoria do desempenho e que boa parte do sucesso obtido pelos sistemas baseados no Just-in-time é fruto de suas práticas compreenderem e reduzirem de forma eficiente as variações existentes. Além disso, pode-se afirmar que a redução da variabilidade está próxima do *core* das práticas da manufatura enxuta (HOPP; SPEARMAN, 2004).

Entretanto, uma vez que as fontes e a existência de variação dificilmente podem ser totalmente eliminadas e que o aumento da variedade de produtos oferecidos colabora para o aumento da variabilidade, algumas medidas devem ser tomadas visando garantir o bom desempenho dos sistemas sujeitos a variação. A forma mais tradicional de proteção contra as variações é a utilização de estoque de segurança ou pulmão de peças (WHYBARK; HURLEY, 1999). Hopp e Spearman (2001) definem que as variações podem ser acomodadas ou amortecidas com a utilização de *buffers* de capacidade, estoque ou tempo. Klassen e Menor (2007) ampliam a discussão do uso dos *buffers* de capacidade e estoque, propondo um *trade-off* fundamental de processos entre as variáveis.

Este trabalho inicia uma revisão bibliográfica buscando entender a relação entre as variáveis que compõe o *trade-off* de processos, analisando alternativas para acomodação das inevitáveis variações a que um sistema de produção está sujeito, com objetivo de garantir bons níveis de desempenho e atendimento ao cliente.

Um modelo de simulação será construído, visando analisar as relações entre as variáveis presentes no *trade-off* de processos, e o impacto de cada uma delas no desempenho de um sistema de produção simplificado, composto por uma única estação de trabalho, responsável pela produção de um mix de 10 produtos.

1.1 DELINEAMENTO DO TRABALHO

O Capítulo 2 irá apresentar os conceitos mais importantes utilizados neste trabalho, além de realizar uma revisão bibliográfica que identifica lacunas e oportunidades de pesquisa.

Já no Capítulo 3, o escopo da pesquisa é definido, assim como o método de pesquisa e o método de desenvolvimento do modelo de simulação.

No Capítulo 4, o sistema de produção a ser simulado é descrito em detalhes. O modelo é descrito de forma conceitual, com o uso de relações matemáticas e fluxogramas. Além disso, a validação de modelo implementado é descrita, através de dados preliminares decorrentes da execução do modelo e do comportamento das variáveis envolvidas no experimento.

No Capítulo 5, os resultados operacionais e de custo são apresentados e discutidos. O Capítulo 6 apresenta as conclusões, seguido pelas Referências Bibliográficas utilizadas e anexos.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo, serão apresentados os conceitos relevantes para a correta definição e entendimento da pesquisa a ser desenvolvida.

Inicialmente, uma revisão bibliográfica sobre o sistema kanban será realizada, incluindo suas regras de funcionamento e diferentes métodos de dimensionamento. Em seguida, são discutidos os termos da variabilidade nos sistemas de produção, bem como a utilização de *buffers* visando acomodar os impactos negativos das variações no desempenho dos sistemas.

2.1 SISTEMA KANBAN

O sistema kanban tem sido amplamente estudado, desde o primeiro artigo acadêmico publicado em 1977 (HOPP; SPEARMAN, 2004) até as muitas revisões bibliográficas mais recentes (BERKLEY, 1992; HUANG; KUSIAK, 1996; AKTURK; ERHUN, 1999; KUMAR; PANNEERSELVAM, 2007). Trata-se de uma técnica simples para o controle de produção, cujo objetivo é controlar a liberação de trabalho para o chão de fábrica, reduzindo a quantidade de material em processo e os *lead times* de produção (SIPPER; BULFIN, 1997).

Um sistema kanban busca estabelecer uma comunicação entre o fornecedor e um cliente, seja ele interno ou externo, fazendo com que a sinalização da necessidade de reposição para o chão de fábrica seja baseada no consumo real do produto (SIPPER; BULFIN, 1997), não em previsões de demanda. O estoque controlado por um sistema kanban é chamado de 'supermercado'. Num supermercado, o cliente pode obter a qualquer momento as peças certas nas quantidades corretas, de forma que seu abastecimento seja garantido. Onde existe um sistema kanban em

funcionamento, os programas de produção não são necessários (ROTHER; SHOOK, 1999).

A palavra kanban significa cartão ou sinal (SIPPER; BULFIN, 1997). O sistema é normalmente operacionalizado com o uso de cartões, que tem a função de avisar o processo fornecedor a respeito do consumo realizado por seus clientes. O sistema pode funcionar com uso de somente um tipo de cartão, mais simples, ou com dois tipos. A seguir, as duas possibilidades e o uso de cada uma delas são explicadas.

2.1.1 Sistema kanban de um cartão

Um sistema kanban de um cartão, ou de cartão simples, opera com somente o chamado kanban de produção. Este cartão é responsável por autorizar o processo fornecedor iniciar a reposição do supermercado. Se não existirem cartões kanban de produção no processo fornecedor, a reposição não deve ser realizada.

A dinâmica de funcionamento do sistema é bastante simples. Sempre que um produto for produzido, as peças devem ser mantidas num supermercado, com um kanban de produção anexado a cada embalagem do produto disponível (MONDEN, 1981; SLACK et al., 2002; TARDIN, 2001).

Sempre que uma embalagem do produto no supermercado for totalmente consumida, o cartão kanban é colocado numa caixa de coleta de cartões, próxima ao supermercado. Com uma periodicidade definida, o cartão kanban deve ser levado da caixa de coleta para um quadro, localizado próximo ao processo fornecedor. A Figura 2.1 ilustra o processo. O quadro, juntamente com os cartões kanban, informará ao chão de fábrica quais produtos devem ser produzidos, e qual a quantidade a ser produzida, além de informar quais produtos ainda permanecem com estoque suficiente e não precisam ser repostos.

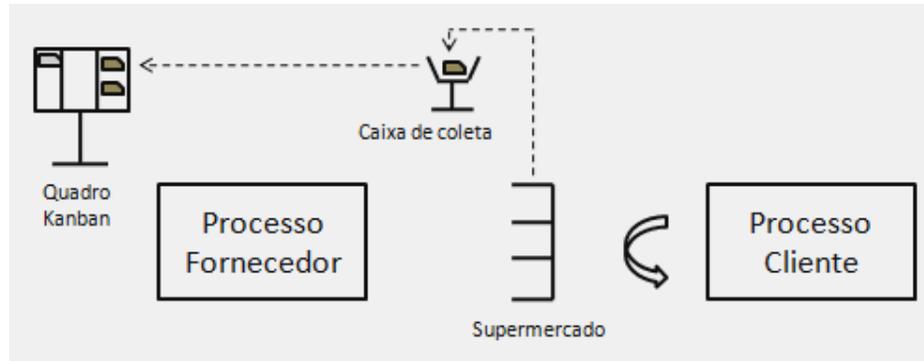


Figura 2.1 - Retorno do cartão kanban de produção à caixa de coleta e ao quadro.

Após iniciar a reposição, um cartão deverá ser retirado do quadro a cada embalagem do produto produzida. Por fim, cada embalagem com o produto deverá ser novamente colocada no supermercado, ficando novamente disponível para o abastecimento do cliente (TARDIN, 2001). A Figura 2.2 ilustra a reposição do supermercado. Num sistema de um cartão, existe somente um supermercado localizado entre o processo fornecedor e o processo cliente.

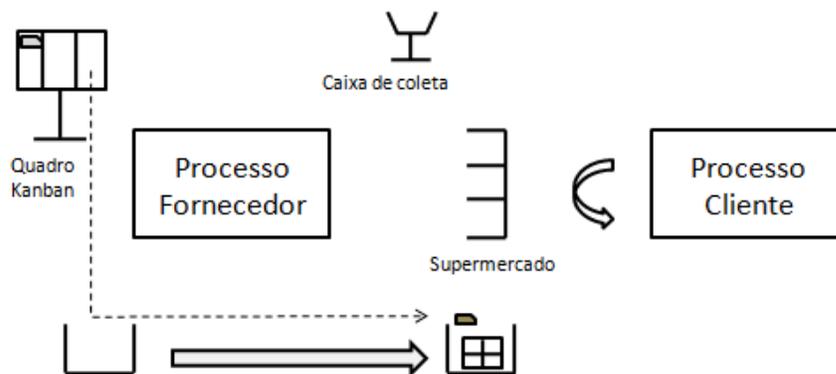


Figura 2.2 - Reposição do supermercado e devolução do kanban de produção para junto do produto.

O sistema de um cartão, ou cartão simples, é mais utilizado devido a sua simplicidade, ainda que o sistema de dois cartões proporcione maior controle do sistema (SIPPER; BULFIN, 1997). A seguir, o sistema de dois cartões será descrito.

2.1.2 Sistema kanban de dois cartões

O sistema de dois cartões é um pouco mais complexo do que o sistema de um cartão, uma vez que existem dois *loops* de cartões distintos no sistema. Além do kanban de produção, que autoriza a reposição do supermercado abastecido pelo fornecedor, existe outro tipo de cartão, chamado kanban de retirada (TARDIN, 2001). Este segundo tipo de cartão possui função diferente do primeiro, controlando a transferência de material de uma estação de trabalho para a outra. A seguir, a dinâmica do sistema e o fluxo de seus dois de cartões serão apresentados.

Uma diferença básica é a existência, no sistema de dois cartões, de dois supermercados, ao invés de um. Um deles está junto ao processo cliente e o outro junto processo fornecedor. Da mesma forma, duas caixas de coleta de cartão são necessárias, uma junto ao processo fornecedor, outra junto ao processo cliente. Quando o cliente consumir totalmente uma embalagem com o produto que estava disponível em seu supermercado, o kanban de retirada é levado até a caixa de coleta de cartões localizada próximo ao processo (TARDIN, 2001). A Figura 2.3 ilustra o processo.

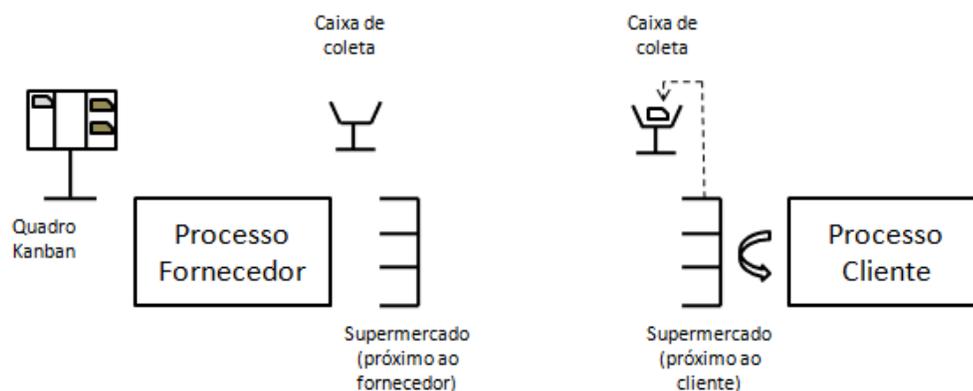


Figura 2.3 - Devolução do kanban de retirada para a caixa de coleta de cartões.

Com uma periodicidade definida, o kanban de retirada é levado até o supermercado do fornecedor, onde a compra é permitida. O kanban de retirada será anexado ao

material comprado, que será transferido para o supermercado do cliente. Neste momento, o kanban de produção é substituído pelo cartão de retirada, de forma que uma embalagem do produto nunca permanece sem um cartão anexado. O kanban de produção, que estava anexado ao produto no supermercado do fornecedor, é devolvido a caixa de coleta de cartões localizada junto ao fornecedor. A Figura 2.4 mostra o fluxo de material e cartões.

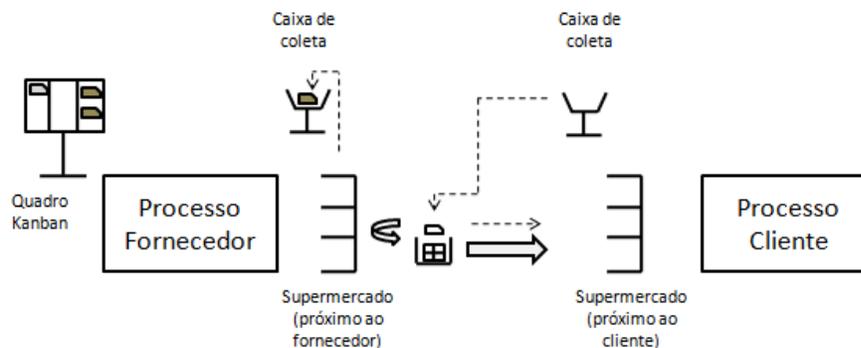


Figura 2.4 - Substituição do kanban de produção pelo kanban de retirada e transferência do material para o supermercado do cliente.

Da mesma forma que o sistema de um cartão, o kanban de produção será levado da caixa de coleta ao quadro com uma frequência definida, onde a necessidade de reposição será informada ao processo fornecedor. Uma vez produzido, o produto retorna ao supermercado do fornecedor juntamente com o kanban de produção, ficando disponível para o cliente. O processo é mostrado pela Figura 2.5.

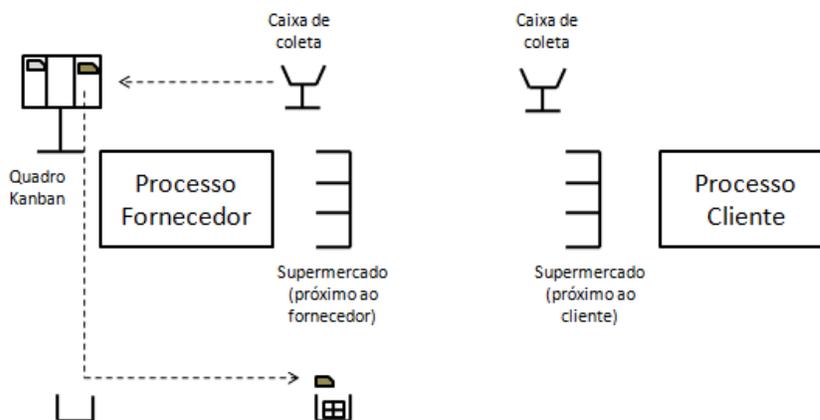


Figura 2.5 - Retorno do kanban de produção ao quadro e reabastecimento do supermercado do fornecedor.

O sistema de dois cartões é normalmente utilizado quando o processo do fornecedor e o processo do cliente são muito distantes um do outro. Além disso, o uso de dois cartões é considerado mais eficiente, uma vez que é capaz de limitar a quantidade de material transferido a cada vez do supermercado do fornecedor para o supermercado do cliente, garantindo que o consumo ocorra de forma nivelada (SIPPER; BULFIN, 1997).

2.1.3 Regras de funcionamento

Além da descrição do fluxo de cartões e materiais apresentada na seção anterior, algumas regras fornecem mais detalhes sobre o funcionamento do sistema. Slack et al. (2002), definem um conjunto de regras para a correta utilização do sistema, mostradas a seguir:

- ✓ Cada cartão deve ter uma indicação do código da peça, quantidade de peças e uma identificação do processo cliente e do processo fornecedor;
- ✓ Nenhuma peça pode ser produzida se o cartão de produção correspondente não estiver disponível no quadro;
- ✓ A quantidade de peças por container deve ser padronizada;
- ✓ Peças com defeito não devem ser transferidas para o supermercado;
- ✓ O fornecedor só pode produzir peças para repor o consumo do cliente;
- ✓ O número de cartões deve ser continuamente reduzido.

Dentre as regras citadas, vale destacar a última delas. Uma vez que a quantidade de cartões no sistema define a quantidade total de material em processo, se a quantidade de cartões for reduzida, a quantidade de material em processo também será reduzida.

Huang e Kusiak (1996) definem uma regra adicional, que é a descentralização das tomadas de decisão, de forma que a definição por qual peça produzir, e qual quantidade deve ser realizada de forma ágil pelo próprio chão de fábrica.

2.1.4 Métodos de dimensionamento de cartões

Serão apresentados 3 métodos de dimensionamento de kanbans. O primeiro e mais conhecido método é o proposto por Monden (1981), que é o método original utilizado pela Toyota para definir a quantidade de kanbans. A eq.(2.1) apresenta o cálculo.

$$N = d \times L \times (1 + \alpha) / C \quad (2.1)$$

Sendo:

N = número de cartões de produção ou cartões de retirada para um produto;

d = demanda por unidade de tempo (diária, considerando a produção nivelada);

L = tempo entre duas reposições consecutivas, considerando o tamanho do lote de produção e o tempo necessário para que seja consumido;

C = capacidade de peças num container;

α = coeficiente de segurança, usualmente menor do que 10%.

Dessa forma, o numerador da eq.(2.1) representa a demanda média durante o período entre duas reposições, mais um fator de segurança que depende da eficiência do processo de produção e de incertezas no fornecimento. Vale mencionar que nenhum fator da eq.(2.1) prevê qualquer tipo de correção se existirem variações na demanda do produto.

Um segundo método de dimensionamento é proposto por Smalley (2004), mostrado pela eq.(2.2). O resultado deste cálculo define a quantidade de peças, não de cartões.

$$I = D \times L \times (1+V) \times (1+S) \quad (2.2)$$

Sendo:

I = estoque no supermercado;

D = demanda diária média;

L = tempo entre duas reposições consecutivas, considerando o tamanho do lote de produção e o tempo necessário para que seja consumido;

V = variação de demanda definida como uma porcentagem de $D \times L$;

S = fator de segurança definido como uma porcentagem de $D \times L \times (1+V)$.

De acordo com este método, o coeficiente de segurança 'α' descrito no método de Monden (1981) é desdobrado em dois fatores. O fator 'V' deve contemplar dois desvios padrão e portanto, conferir proteção contra 95% das variações nos pedidos. O fator 'S' existe em função de perdas referentes a qualidade, retrabalho e quebra de máquinas. Caso não ocorram problemas, o nível de estoque deve flutuar sem utilizar os fatores de segurança e sem considerar a variação de demanda.

Um terceiro método de dimensionamento, proposto por Tardin (2001), será explicado. Uma diferença fundamental é utilizar faixas de cores como forma de realizar a priorização de produção. Para cada produto, a quantidade total de cartões é composta pela soma de três parcelas (faixas de estoque), como mostrado na eq.(2.3).

$$\text{Quantidade de cartões} = \text{faixa verde} + \text{faixa amarela} + \text{faixa vermelha} \quad (2.3)$$

Antes de detalhar o método de cálculo de cada uma das faixas, o procedimento de utilização de um sistema kanban para um produto que utiliza um quadro com 3 cores será explicado, mostrado pela Figura 2.6. Quando houver mais de um produto, o comportamento será semelhante, mas cada produto poderá estar em uma situação diferente. Considerando o consumo regular de peças de um produto, o estoque será reduzido até que a faixa amarela seja atingida (ponto A). O estoque na faixa amarela

indica que a reposição do produto deve ser realizada assim que possível. O estoque continuará a ser consumido, uma vez que a produção do lote anterior deve ser concluída, e que uma preparação (setup) deve ser realizada. Quando essas atividades forem concluídas, a reposição do produto é iniciada (ponto B). A produção do produto será finalizada quando o lote padrão for concluído (ponto C), permitindo a produção de outro produto pela estação de trabalho. Normalmente, a faixa vermelha do estoque só é utilizada quando existem perdas que comprometem o abastecimento.

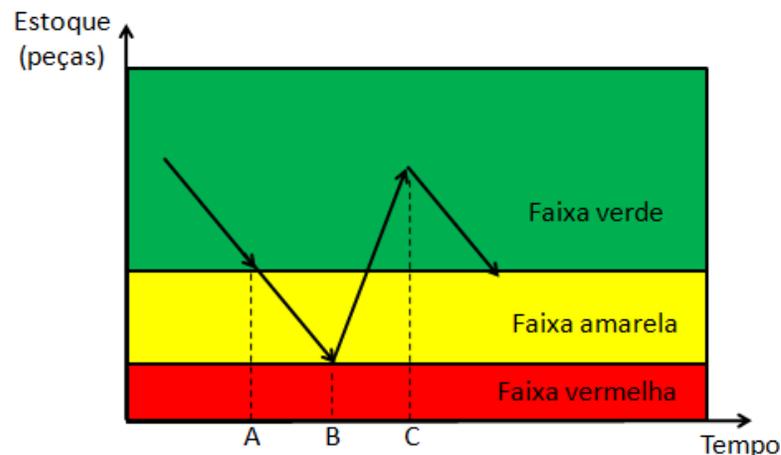


Figura 2.6 - Procedimento de utilização de um quadro kanban com 3 cores (Fonte: Tardin, 2001).

O aspecto de um quadro kanban que utiliza o método considerado é mostrado na Figura 2.7. Os espaços brancos no quadro representam todas as posições que os cartões kanban podem ocupar. Os cartões kanban são representados pelos retângulos pretos, que somente podem ocupar os espaços demarcados (retângulos brancos). Assim permite-se a utilização das faixas no quadro, cuja função é definir a prioridade de produção de cada item, já que o número de kanbans de cada produto não é o mesmo para todos os produtos. Para cada cartão em circulação no sistema haverá um espaço demarcado no quadro, independente da existência do produto no momento.

A medida que o estoque do produto for consumido, os cartões kanban são colocados no quadro de cima para baixo. Assim a faixa verde será ocupada em

primeiro lugar. Após preencher todos os espaços demarcados existentes na faixa verde, os cartões são colocados na faixa amarela, e só depois na faixa vermelha. Quando a reposição dos estoques for realizada, os cartões kanban são retirados do quadro de baixo para cima, primeiramente pela faixa vermelha, em seguida pela faixa amarela, para só então serem retirados da faixa verde.

Quando um produto possui cartões no quadro ocupando somente a faixa verde, isso indica que, no momento, existe material no supermercado em quantidade suficiente para atender a demanda do cliente, de forma que este produto ainda não precisa ter sua produção priorizada. Se os cartões também ocuparem a faixa amarela, o quadro sinaliza que boa parte do supermercado já foi consumido e que a reposição do estoque é necessária. Por fim, se os cartões também ocuparem a faixa vermelha, o quadro sinaliza que a reposição do estoque do produto deve ser realizada com urgência, já que o abastecimento do cliente pode ser comprometido.

Quadro Kanban										
Faixa verde	█	█	□	█	█	█	█	█	█	
	█	█	□	█	█	█	█	█	█	
	█	□	□	█	█	□	█	█	█	
	█	□	□	□	█	□	█	█	█	
Faixa amarela	█	□	□	□	█	□	█	█	□	
	█	□	□	□	█	□	█	█	□	
	█	□	□	□	█	□	█	█	□	
Faixa vermelha	□	□	□	□	□	□	█	□	□	
	□	□	□	□	□	□	█	█	□	
	Produto A	Produto B	Produto C	Produto D	Produto E	Produto F	Produto G	Produto H	Produto I	Produto J

Figura 2.7 - Exemplo de quadro kanban.

No exemplo da figura 2.7, os produtos B, C, D, F e J não precisam ser repostos. O produto C está com estoque máximo, já que nenhum cartão kanban está presente no quadro. Os produtos A, E, G, H e I precisam ser repostos. Além disso, em particular, os produtos G e I estão indisponíveis, já que todos os cartões kanban existentes no sistema para esses produtos estão no quadro.

Cada uma das faixas mostradas acima possui um significado, que define seu método de cálculo, sendo explicado a seguir.

O tamanho da faixa verde corresponde ao tamanho do lote padrão de produção de cada produto. O tamanho dos lotes depende da demanda de cada um dos produtos e também do número de lotes planejados em que se pretende atender toda a demanda do produto. Para se definir a quantidade de lotes, é necessário definir a quantidade de setups que podem ser realizados para cada produto, calculados através de uma análise agregada de capacidade (envolvendo todos os produtos), conforme esquema da Figura 2.8.

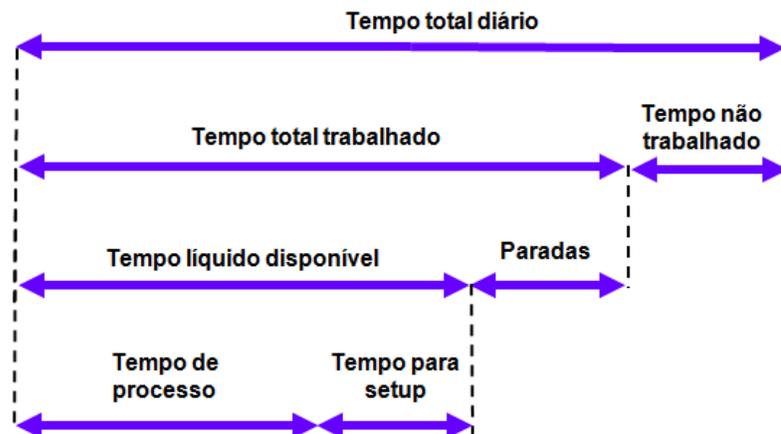


Figura 2.8 - Lógica da análise de capacidade que define a quantidade de setups possível num período.

Como mostrado na figura 2.8, a partir do tempo total diário, desconta-se o tempo não trabalhado, que compreende os turnos de trabalho não existentes, o período de refeições e descansos, etc. O resultado é o tempo total trabalhado, que está sujeito a paradas referentes a quebras de máquina, falta de matéria prima, etc, de forma que o tempo líquido disponível é definido. O tempo líquido disponível é dividido entre o tempo em que a estação de trabalho estará produzindo os produtos (tempo de processo, que só depende da demanda de produtos e dos tempos de ciclo de cada peça), e o tempo restante destinado a realização de setups (de todos os produtos). O maior número de setups possível (para todos os produtos) será calculado, desde que a capacidade de produção (ou tempo líquido disponível) não seja excedida. Se não houver capacidade de produção suficiente para produzir todos os produtos diariamente, e período total deverá ser maior, fazendo com que menos setups sejam realizados, menos tipos de produtos sejam produzidos em lotes maiores. Havendo

capacidade de produção suficiente, o número total de setups será rateado entre todos os produtos, definindo a quantidade de setups de cada produto. A quantidade de setups de cada produto, e portanto número de lotes produzidos, pode ser distinta entre si.

Assim, a quantidade de cartões na faixa verde para cada produto é definida pela eq.(2.4), mostrada a seguir:

$$\text{Faixa verde} = d_j / (s_j \times C_j) \quad (2.4)$$

Sendo:

d_j = Demanda diária média do produto j , ($j=1,2,\dots,10$);

s_j = Número de setups por produto j por dia;

C_j = Capacidade de peças no container do produto j .

O dimensionamento da faixa amarela corresponde a demanda durante o período em que a estação de trabalho identifica a necessidade de repor os estoques até que a reposição seja de fato iniciada. O *lead time* de reposição deve contemplar o tempo de produção do lote mais demorado (tempo de fila no processo), o tempo de preparação da máquina, o tempo de produção do lote, o tempo de transferência do produto até o supermercado, etc. Assim, a quantidade de cartões na faixa amarela pode ser definida pela eq.(2.5).

$$\text{Faixa amarela} = (d_j \times L) / C_j \quad (2.5)$$

Sendo:

d_j = Demanda diária média do produto j , ($j=1,2,\dots,10$);

L = Lead time de reposição (em dias);

C_j = Capacidade de peças no container do produto j .

Entretanto, nos casos em que a demanda do cliente não ocorre de forma nivelada, o cálculo deve ser realizado de outra forma, já que o consumo poderá ser realizado antes do processo de reposição ser concluído, gerando desabastecimento. O tamanho da faixa amarela deverá contemplar o tamanho das retiradas do cliente. A eq.(2.6) mostra o cálculo.

$$\text{Faixa amarela} = R_j / C_j \quad (2.6)$$

Sendo:

R_j = Tamanho das retiradas do cliente (em peças) do produto j , ($j=1,2,\dots,10$);

C_j = Capacidade de peças no container.

Por fim, a faixa vermelha corresponde ao estoque de segurança, definido pelo consumo médio durante o tempo de proteção desejado. A segurança se justifica devido à quebra de equipamentos, incertezas no fornecimento de matéria-prima, variação de mix e de volume. O cálculo da faixa vermelha é mostrado pela eq.(2.7).

$$\text{Faixa vermelha} = P \times d_j / C_j \quad (2.7)$$

Sendo:

P = Tempo de proteção (em dias);

d_j = Demanda diária média do produto j , ($j=1,2,\dots,10$);

C_j = Capacidade de peças no container.

Assim, definido o cálculo de cada uma das faixas, o dimensionamento de cartões kanban para cada produto é dado pela soma das 3 faixas.

O terceiro método apresentado também apresenta um fator de segurança, prevendo perdas no processo de abastecimento. Variações nos níveis de demanda não são consideradas.

Os três métodos descritos possuem alguns pontos em comum, que é a dependência do nível de demanda, do tempo de reposição dos estoques e de pelo menos um parâmetro que aumenta o nível dos estoques, em função de incertezas existentes.

O último método descrito, combinando dimensionamento de diferentes aspectos e utilização de gestão visual no chão de fábrica constitui um método mais completo. As diferentes cores estabelecem uma relação comparativa entre os estoques de cada produto, permitindo a definição clara de prioridades de reposição, que não dependem somente da quantidade total de cartões.

2.1.5 Condições para utilização do Sistema Kanban

Rother e Shook (1999) defendem o uso do sistema kanban em algumas situações. A primeira e mais importante delas é a impossibilidade de se estabelecer fluxo contínuo entre dois processos. Pode-se utilizar o sistema kanban quando os processos de produção forem muito longos ou instáveis. Por fim, quando os tempos de processo do fornecedor e do cliente são muito distintos, a utilização do kanban também é recomendada.

Em vários trabalhos, as condições necessárias para a adequação e bom desempenho do sistema kanban são apresentadas. Sipper e Bulfin (1997) destacam que o sistema trabalha de forma eficiente quando o fluxo é uniforme e o mix de produtos é estável. Os autores ressaltam ainda que os setups de máquina devem ser curtos, já que estes ocorrem frequentemente, e que o sistema não funciona de forma satisfatória se o mix de produtos ativos é muito grande. O bom funcionamento do sistema mediante alto mix de produtos também é questionado por Uzsoy e Martin-Vega (1990).

Duggan (2002) salienta que nem todos os produtos de um mix devem ser controlados por um sistema kanban. Para o autor, os itens escolhidos devem ser os de alta demanda e/ou alta frequência de consumo. Itens que não possuem este comportamento devem ser programados, ou seja, produzidos somente quando o cliente os solicita.

Além destes requisitos, a necessidade de estabilidade da demanda (baixa variação) é citada em vários trabalhos e considerada determinante para seu bom desempenho. Monden (1981) afirma que a variação da demanda deve ser inferior a 10% para que o desempenho do sistema seja satisfatório. O autor não especifica como esse limite é definido, nem se essa variação refere-se a cada produto ou variação no volume total de todo o mix de produtos. Marek; Elkins e Smith (2001) afirmam que grandes variações no volume e mix de produtos destroem o fluxo de produção e prejudicam os objetivos de desempenho do sistema. Já Takahashi; Morikawa e Nakamura (2004) defendem que o sistema não se adapta a variações na demanda grandes e repentinas.

Sipper e Bulfin (1997) chamam atenção para o fato de que alta variação exige maior número de cartões kanban no sistema, ou seja, maiores estoques.

Maccarthy e Fernandes (2000), ao propor um método para a seleção do sistema de planejamento e controle da produção a ser utilizado para cada situação, definem que o fator determinante para a escolha é o nível de repetitividade do processo, estabelecendo que o sistema kanban é adequado para ambientes de produção em massa e sistemas repetitivos. Nenhuma definição é realizada considerando o comportamento da demanda e a existência de variação.

Também de forma distinta de outros trabalhos, Smalley (2004) salienta que, em geral, um sistema está sujeito a pequenas variações de volume total. Entretanto, grandes variações de demanda são verificadas se o volume dos produtos é observado individualmente. O autor não afirma que o sistema kanban apresenta desempenho ruim se a demanda dos produtos estiver sujeita a variações, ainda que preveja um aumento dos estoques dimensionados em função dessas variações, conforme afirmações de outros autores. Por fim, o autor lembra que variações podem ser geradas internamente num sistema, não dependendo de oscilações de demanda para isso.

Diante da possibilidade das variações prejudicarem o desempenho de um sistema kanban, faz-se necessário entender um pouco melhor as variações e como elas são geradas. Isso será realizado na próxima seção.

2.2 VARIABILIDADE

O conceito de variabilidade será apresentado, seguido de uma descrição das fontes que podem gerar variações. Em seguida, os impactos e consequências para os sistemas são mostrados. Por fim, estratégias de proteção e amortecimento das variações são discutidas.

2.2.1 Variabilidade e fontes de variação

Hopp e Spearman (2001) afirmam que a variabilidade está presente em todos os sistemas de produção. Os dois autores estabelecem um conceito formal sobre a variabilidade, como a não uniformidade de características de uma entidade. Num sistema de manufatura, inúmeras características estão sujeitas a variabilidade, tais como: dimensão física, tempos de processo, medições de qualidade, temperatura, dureza dos materiais, etc.

As variações num sistema podem ser geradas externamente, devido principalmente ao comportamento da demanda. Entretanto, as variações podem ser transmitidas e amplificadas a cada etapa dentro de um sistema, em função das práticas adotadas (Smalley, 2004). A seguir, são apresentadas fontes de variações nos sistemas.

Externamente ao sistema, variações podem ser geradas devido a mudanças e oscilações nos níveis de demanda. Smalley (2004) afirma que um sistema está sujeito a pequenas variações nos volumes totais de demanda. Entretanto, variações nos volumes de cada produto podem ser bastante significativas. Lee; Padmanabhan e Whang (1997) destacam algumas causas para a origem de variações de demanda. A primeira delas está relacionada ao processo de sinalização de demanda, uma vez que não existe visibilidade das demandas futuras e grande possibilidade de erros na geração de previsões. A segunda, relacionada a prática de formação de lotes, uma vez que os custos envolvidos nas transações de compra e venda podem ser elevados. A terceira é a existência de oscilações dos níveis de preço. Por fim, existe a possibilidade de escassez do produto no mercado, o que pode gerar pedidos maiores do que as necessidades reais prevendo entregas parciais.

Em relação a variações geradas internamente aos sistemas, inúmeras causas podem ser citadas. Hopp e Spearman (2001) definem um primeiro grupo de causas de variabilidade, relacionadas ao tempo de processo. Trata-se de uma não uniformidade no tempo de duração dos processos. Considerando processos de manufatura, existe uma variabilidade natural associada a todos eles, sendo mais evidente em processos manuais, ainda que também seja verificada em processos automatizados.

Além disso, vários tipos de paradas ou interrupções dos processos são fontes de variação. Paradas não programadas, tais como falta de energia, quebra de máquina, falta de operador, geram impacto, de forma que quanto maior o tempo de duração das interrupções, maiores as variações geradas no sistema.

Paradas planejadas, tais como realização de setups, manutenção planejada, reunião de operadores, etc, possuem efeitos semelhantes. Entretanto, essa segunda categoria pode ser gerenciada de forma mais eficiente, uma vez que os eventos são previsíveis. Ainda que o tempo total de parada seja o mesmo, mas que as frequências de realização sejam distintas, o impacto no sistema poderá ser minimizado.

Uma segunda categoria de variação é definida, ligada ao fluxo (HOPP; SPEARMAN, 2001). Variações podem ser geradas em função das taxas de chegadas e dos

tempos entre chegadas consecutivas. A Figura 2.9 ilustra situações de baixa e alta variação nos tempos entre chegadas ou partidas.

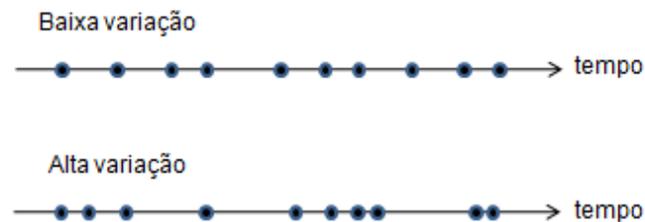


Figura 2.9 - Processos de chegadas ou partida com baixa e alta variação (Fonte: Hopp e Spearman, 2001)

De forma semelhante às chegadas, as partidas podem estar sujeitas a esse tipo de comportamento, podendo impactar também processos posteriores.

2.2.2 Variabilidade e impacto nos sistemas

Para Sipper e Bulfin (1997), a variabilidade é considerada um 'inimigo universal', uma vez que está presente em todos os sistemas e que pode impactar negativamente seu desempenho. Ainda que a existência e o efeito do aumento das variações num sistema seja pouco intuitivo, as conseqüências podem ser observadas mais facilmente: perda de *throughput* (vazão), grandes estoques, *longos* tempos de resposta, nível de serviço ao cliente ruim, perda de capacidade, ou uma combinação de mais uma delas (HOPP; SPEARMAN, 2004).

Para Hopp e Spearman (2001), a existência de variabilidade implica em custo, e uma vez que a variabilidade está presente de forma significativa em praticamente todos os processos, esse custo é inevitável. Para os autores, quanto maior os níveis de variação existentes num sistema, maiores os custos necessários para que o desempenho deste sistema seja satisfatório.

Tal fato é amplamente reconhecido, uma vez que a redução dos níveis de variação é considerada uma alternativa para a melhoria do desempenho dos sistemas (SIPPER; BULFIN, 1997). Langley *et al.*(1996), salientam que a redução das variações confere maior previsibilidade as saídas ou resultados de um processo. Hopp e Spearman (2001) afirmam que a redução da variabilidade é central na melhoria do desempenho e que boa parte do sucesso obtido pelos sistemas baseados no Just-in-time é resultado de suas práticas compreenderem e reduzirem de forma eficiente as variações existentes. Além disso, pode-se afirmar que a redução da variabilidade está ligada ao *core* das práticas da manufatura enxuta (HOPP; SPEARMAN, 2004).

Entretanto, uma vez que as fontes e a existência de variação dificilmente podem ser eliminadas, considerando até que algumas delas são geradas externamente aos sistemas, algumas medidas devem ser tomadas visando garantir o bom desempenho dos sistemas. Hopp e Spearman (2001) definem que as variações podem ser acomodadas ou amortecidas com a utilização de *buffers*. Na seção seguinte, a utilização e o significado dos *buffers* serão apresentados.

2.2.3 Buffers

Hopp e Spearman (2001) não definem um significado específico para o termo *buffer*. A palavra, às vezes, é utilizada como pulmão de peças (HURLEY; WHYBARK, 1999), utilizado para evitar a perda de capacidade de produção em recursos gargalo, conforme a teoria das restrições enfatiza, ou através de estoques de segurança de produtos acabados, de forma que quanto maior a variação da demanda, maiores os estoques necessários para garantir o abastecimento.

Entretanto, como será visto a seguir, o uso do termo por Hopp e Spearman (2001) é mais abrangente do que o apresentado anteriormente. Os dois autores estabelecem um princípio, afirmando que a variabilidade num sistema de produção deve ser acomodada ou amortecida por alguma combinação dos seguintes *buffers*: estoque,

capacidade e tempo. Os exemplos a seguir, ilustrando sua utilização em diferentes circunstâncias, ajudam a entender o conceito e sua abrangência.

- ✓ Considerando um varejista de produtos de baixo custo, cuja demanda é variável. Caso os consumidores não encontrem o produto no estoque do varejista, eles devem procurar o produto em outro estabelecimento, desconsiderando a hipótese do atendimento ao pedido com atraso (*backorder*) e que um pico de demanda gere perda de venda. Dessa forma, não se pode prevenir a perda da venda com um *buffer* de tempo. Como a entrega do produto deve ser imediata, não existe a possibilidade da utilização de um *buffer* de capacidade para realizar a produção imediata. Por fim, resta a possibilidade da utilização de um *buffer* de estoque. Uma quantidade adicional de peças deverá ser mantida em estoque, considerando a variação de demanda.
- ✓ Considerando serviços de emergência, tais como bombeiros e ambulância. A demanda por esses serviços claramente apresenta variação, uma vez que as pessoas não podem planejar emergências. Não podemos utilizar um *buffer* de estoque, uma vez que o serviço só pode ser acionado após o acontecimento que gera a necessidade ocorrer, nem utilizar um *buffer* de tempo, já que o tempo até o atendimento é o indicador chave nesse tipo de serviço. Os atendimentos devem ser imediatos. A única opção é o excesso de capacidade (*buffer*) visando atender picos de demanda, ainda que isso gere baixos níveis de utilização dos recursos no médio e longo prazo.
- ✓ Considerando o serviço médico de transplante de órgãos. A demanda por transplantes é variável, assim como o fornecimento, possibilitado pela morte de doadores. Eticamente, é impossível aumentar o fornecimento de órgãos e a capacidade de transplantes. Uma vez que órgãos possuem uma vida útil curta após a morte dos doadores, não se pode construir um *buffer* de estoque. Dessa forma, o único *buffer* possível é o tempo, fazendo com que o tempo de espera por um transplante seja longo.

Assim, pode-se definir a utilização de um *buffer* como o uso de um recurso em excesso ou com algum grau de superdimensionamento, visando amortecer os efeitos das variações e garantir o bom desempenho do sistema. Conforme mostrado pelos exemplos anteriores, para cada situação um tipo de *buffer* será mais

adequado, dependendo dos objetivos de desempenho estabelecidos. O termo *buffer* será utilizado daqui pra frente neste sentido.

Nos 3 exemplos citados anteriormente, cada um deles descreveu o uso de um tipo de *buffer* de forma isolada, devido a particularidade de cada uma das situações. Entretanto, o Hopp e Spearman (2001) afirmam que a proteção contra os efeitos das variações pode ser realizada pela combinação do uso de dois ou mais dos *buffers* citados anteriormente. Na seção seguinte, o uso combinado dos *buffers* de capacidade e estoque será discutido. O uso de um *buffer* de tempo não será analisado.

2.2.4 Utilização dos buffers de capacidade e estoque

Klassen e Menor (2007) ampliam a discussão do uso dos *buffers* de capacidade e estoque, e da influência das variações. Um *trade-off* fundamental de processos é proposto, envolvendo as variáveis. Antes de prosseguir com o exposto pelos autores, é necessário definir melhor o conceito de *trade-off*. Para isso, será utilizado o exemplo bastante conhecido do lote econômico de compra. De acordo com Slack; Chambers e Johnston (2002), o cálculo do lote econômico de compra pode ser definido pela eq.(2.8).

$$\text{Lote econômico de compra} = \sqrt{(2 \times C_p \times D / C_e)} \quad (2.8)$$

Sendo:

C_p = custo do pedido;

D = demanda no período;

C_e = custo de manutenção do estoque por unidade.

Numa situação como essa, o comportamento esperado para o custo total e para o custo de cada parcela é mostrado na Figura 2.10.

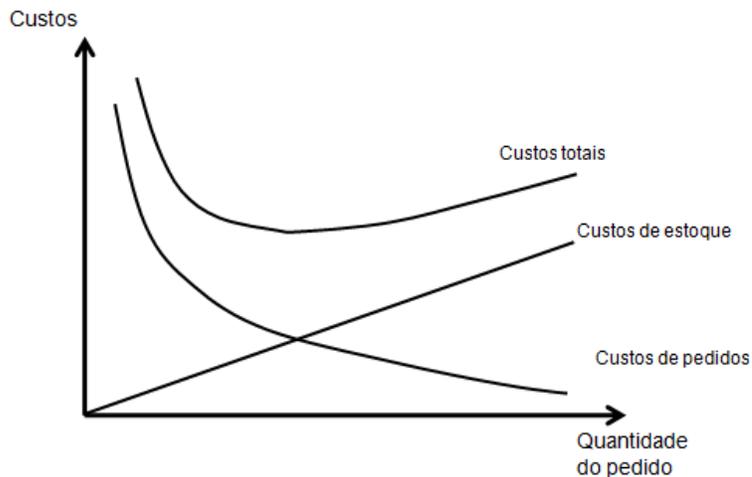


Figura 2.10 - Representação gráfica dos custos totais, de estoque e dos pedidos (Fonte: Slack; Chambers e Johnston, 2002).

Neste exemplo, pode observar que quanto menores o tamanho dos pedidos, maiores o custo para que estes pedidos sejam realizados, porém menores serão os custos dos estoques. Se as quantidades pedidas forem muito grandes, os pedidos serão pouco frequentes, os custos dos pedidos serão pequenos, porém o custo dos estoques será elevado. O *trade-off* é verificado pelo fato de que o custo das parcelas são correlacionadas negativamente, e que existe uma situação em que o custo total é mínimo. Na prática, pode ser difícil identificar a situação mais vantajosa em termos de custo. Ao citar a existência de um *trade-off*, este trabalho irá considerar a explicação e o significado presentes neste parágrafo.

Conforme mencionado anteriormente, o *trade-off* de processos proposto por Klassen e Menor (2007) envolve a relação entre estoque, utilização de capacidade e variação, como mostrado na Figura 2.11. Num dos vértices do triângulo está a utilização de capacidade. Uma vez que a capacidade é uma medida absoluta, os autores preferem o termo utilização da capacidade, uma vez que a variável compara os níveis de demanda com a capacidade do processo. Para reduzir o nível de utilização, considerando um nível de demanda fixo, é necessário aumentar a

capacidade de produção do processo. Trata-se de uma folga ou excesso de capacidade em relação à demanda.



Figura 2.11 - Triângulo de gestão de processo (Fonte: Klassen e Menor, 2007)

Segundo os autores, considerando um sistema sujeito a variações, o aumento da capacidade (redução da utilização) e o aumento do inventário são recursos substitutos com a função de prover melhor desempenho dos processos e serviços aos clientes, podendo ser combinados entre si, podendo ser substitutos. O *trade-off* se caracteriza pelo fato de que maiores níveis de estoque exigiriam menores níveis de capacidade, e vice-versa.

Iniciativas que visem a redução das variações, como estabilização do processo, redução dos tempos de setup e quebras de equipamento (fontes de variação internas ao sistema), farão com que o sistema seja capaz de operar com menores níveis de capacidade e/ou estoque para garantir um bom nível de serviço. Assim, a Figura 2.11 pode ser redefinida, mostrando as três alternativas viáveis para melhorar o serviço ao cliente obtido por um sistema. A novo formato é mostrado na Figura 2.12.

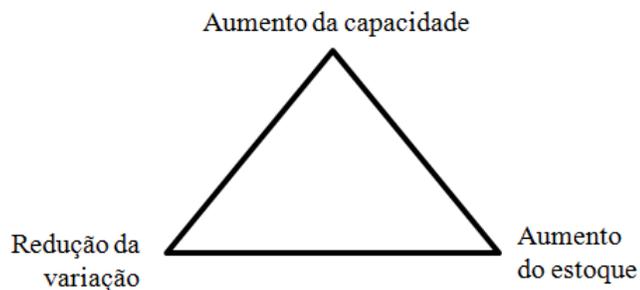


Figura 2.12 - Adaptação do triângulo de gestão de processos.

De acordo com Hopp e Spearman (2004), a Toyota há muito tempo utiliza um *buffer* de capacidade de produção, pela realização de horas extras sempre que as cotas de produção de um turno não forem atingidas no tempo normal de trabalho. Horas extras podiam ser realizadas já que as fábricas da empresa operavam em dois turnos, com folga de 4 horas entre o final de um turno e início do próximo. Assim, estoques de segurança podiam ser substituídos pelo aumento de capacidade, garantindo o nível de serviço desejado. Os dois autores consideram o uso de horas extras como um *buffer* de capacidade, buscando acomodar parte das variações de demanda e perdas de eficiência na produção.

Klassen e Menor (2007), ao analisar o *trade-off* de processos citado anteriormente, consideram dois cenários. O primeiro analisa o impacto de diferentes abordagens de intervenções de parada de máquina para manutenção, considerando diferentes frequências e tempos de realização. Diferentes comportamentos de parada de máquina geram variações no sistema em diferentes níveis (HOPP; SPEARMAN, 2001), conforme mencionado anteriormente. O segundo cenário realiza uma análise a partir de dados agregados da indústria, considerando registros de utilização da capacidade e mudança nos níveis de inventário. Neste segundo caso, vale ressaltar que outros fatores podem influenciar os resultados obtidos.

Mapes (1993) avalia a relação entre as limitações de capacidade e a necessidade de estoque de segurança, num sistema empurrado responsável pela produção de um único item. A demanda é modelada seguindo uma distribuição normal de probabilidade, com diferentes níveis de risco de faltas. Os resultados mostram que quanto maior a capacidade de produção, menor a necessidade de estoques de segurança, e menores os riscos de falta nos estoques. Entretanto, o trabalho realizado pelo autor não contempla nenhuma análise de custo.

Garg; Vrat e Kanda (2001), avaliam o *trade-off* entre o custo do aumento da flexibilidade e o custo do estoque, necessários para se atingir um determinado nível de serviço num sistema sujeito a variações. A análise proposta pelos autores é realizada considerando três cenários distintos. O primeiro é mais simples, para um sistema com um só tipo de produto, com uma linha dedicada. O segundo, para dois produtos, com linhas dedicadas, compartilhadas ou totalmente flexíveis, conforme

ilustrado na Figura 2.13. O terceiro cenário é um estudo de caso para vários produtos produzidos em várias linhas.

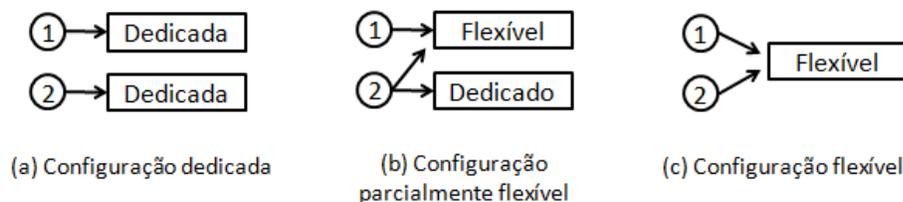


Figura 2.13 - Configuração para dois produtos num sistema de manufatura de estágio simples (single stage) (Fonte: Garg; Vrat e Kanda, 2001)

O método de análise do *trade-off* proposto tem como objetivo minimizar o ‘Custo total relevante’, que pode ser representado pela eq.(2.9).

$$\text{Custo total} = \text{Custo de manutenção dos estoques} + \text{Custo de capacidade adicional} + \text{Custo da flexibilidade de roteiro} + \text{Custo operacional adicional} \quad (2.9)$$

O primeiro cenário estudado pelos autores, com somente uma linha de produção e um tipo de produto, analisa o *trade-off* em relação a CAPACIDADE e estoque, ainda que tenha sido definido como FLEXIBILIDADE. A única opção considerada pelos autores para tornar o sistema mais ‘flexível’, neste caso, é o aumento de capacidade.

De acordo com os resultados apresentados pelos autores, o aumento das horas produtivas pode reduzir a necessidade de estoques de segurança, considerando um determinado nível de variação fixo. Entretanto, essa possibilidade nem sempre é vantajosa em termos de redução de custo. Em processos de capital intensivo (processos contínuos, siderúrgicos, etc), a substituição de estoques por capacidade adicional deverá ser desvantajosa. No caso da manufatura repetitiva, o custo dos materiais pode representar custo elevado frente ao uso de horas produtivas adicionais, tornando essa substituição uma alternativa eficiente e mais econômica

(GARG; VRAT; KANDA, 2001). Além disso, o aumento do mix de produtos também gera aumento da necessidade de estoques de segurança, cenário no qual o uso de maior capacidade de produção pode apresentar maiores vantagens em termos de acomodação das variações do sistema.

3. MÉTODO DE PESQUISA

Nesse capítulo, inicialmente serão definidos os objetivos da pesquisa, baseado nas lacunas identificadas pela revisão bibliográfica. Em seguida, o método de realização da pesquisa será explicitado.

3.1 OBJETIVO DA PESQUISA

O objetivo deste estudo é semelhante aos trabalhos de Klassen e Menor (2007), Mapes (1993) e parte do estudo proposto por Garg; Vrat e Kanda (2001), uma vez que irá analisar as relações entre as variáveis presentes no triângulo de gestão de processos, proposto por Klassen e Menor (2007). Entretanto, este estudo diferencia-se da proposta dos dois autores, já que o modelo a ser desenvolvido deverá considerar que a demanda de cada item é a origem da variação, além da existência de um mix de produtos, ao invés de duas abordagens distintas de parada de máquina para manutenção.

Em relação ao trabalho de Garg; Vrat e Kanda (2001), este estudo irá considerar somente uma linha responsável pela produção de um mix de produtos, ao invés de considerar um sistema com somente um produto. Ao considerar mais de um produto, os modelos propostos pelos autores contemplam a FLEXIBILIDADE das linhas, fato que exigiria investimentos e outras linhas de produção, e que extrapola os objetivos deste trabalho. Mapes (1993), da mesma forma, realiza o estudo num cenário de produção empurrada, para somente um tipo de produto, sem considerar os custos envolvidos.

Dessa forma, este estudo deverá analisar a possibilidade e a viabilidade econômica (redução de custo) de se utilizar capacidade adicional de produção (*buffer* de capacidade) como forma de reduzir os estoques necessários para garantir um determinado nível de serviço, num sistema sujeito a diversos níveis de variação na demanda de um mix de produtos, conforme a prática pioneira da Toyota citada por Hopp e Spearman (2004).

Além disso, este estudo diferencia-se dos demais por realizar a análise num sistema controlado pela lógica do kanban, e não num cenário de produção empurrada tradicional. Conforme mostrado no capítulo anterior, o sistema kanban é considerado inadequado em cenários sujeitos a variações de demanda significativas. Assim, pode-se verificar também se o uso de *buffers* permite a utilização do sistema kanban de forma eficiente, ainda que esteja sujeito a altos níveis de variação de demanda. Se essa possibilidade for confirmada, as condições de utilização definidas por Monden (1981), Marek; Elkins e Smith (2001) e Takahashi; Morikawa e Nakamura (2004) não serão confirmadas.

3.2 MÉTODO DE REALIZAÇÃO DA PESQUISA

Para realizar a análise proposta, um modelo deverá ser construído. De acordo com Bertrand e Fransoo (2002), a pesquisa em gestão de operações frequentemente utiliza a construção de modelos conceituais, considerando modelos como uma abstração ou representação da realidade. A construção de um modelo permite que relações causais e *trade-offs* existentes entre as variáveis tornem-se bastante explícitos, e que os resultados estejam sujeitos a algum tipo de análise matemática.

Deverão ser realizados vários experimentos, considerando as variáveis propostas pelo triângulo de processos: capacidade, estoque e variação. Dessa forma, o desenvolvimento de um modelo de simulação parece bastante adequado, no sentido

de permitir a análise entre as diferentes variáveis envolvidas sob várias condições distintas. Shannon (1998) destaca algumas das vantagens da simulação:

- ✓ Realizar testes para avaliar mudanças em relação ao estado atual de um sistema;
- ✓ Realizar testes de hipótese visando esclarecer a causa de fenômenos envolvidos;
- ✓ Avaliar rapidamente o resultado de uma combinação de variáveis por um longo período de tempo;
- ✓ Obter conhecimento das relações causais entre as variáveis que afetam de forma significativa o desempenho dos sistemas;
- ✓ Realizar experimentos e responder perguntas do tipo “e se”;

As possibilidades listadas permitem atender as necessidades e análises propostas por esse estudo, justificando a escolha do método.

3.3 DESENVOLVIMENTO DO MODELO DE SIMULAÇÃO

De acordo com Shannon (1998) e Law e Kelton (2000), para que a construção de um modelo seja eficientemente realizada, e para que os resultados obtidos sejam representativos, algumas etapas devem ser cumpridas durante o desenvolvimento, sendo apresentadas a seguir.

1. Definição do problema: o desenvolvimento de um modelo normalmente é motivado pela existência de um problema, que deve ser corretamente entendido; pessoas participantes do sistema real devem auxiliar nessa descrição;

2. Planejamento do projeto: visa definir os objetivos e os recursos envolvidos no desenvolvimento;
3. Definição de um modelo conceitual: o sistema real é normalmente descrito através de um modelo conceitual, utilizando fluxogramas e relações matemáticas e de lógica;
4. Coleta de dados referentes ao sistema real, utilizados na construção do modelo;
5. Desenvolvimento do modelo;
6. Execução do modelo desenvolvido;
7. Verificação e validação: análise do modelo construído e dos resultados prévios apresentados, com o objetivo de assegurar que o modelo representa de forma satisfatória o sistema real;
8. Definição dos cenários a serem simulados: é o planejamento do experimento, onde são definidas as variáveis a serem analisadas durante as execuções, além do período de duração das simulações, número de replicações, etc;
9. Realização dos experimentos;
10. Novas replicações: novas execuções do modelo podem ser realizadas, em função dos resultados que análises prévias possam indicar;
11. Documentação e análise dos resultados;
12. Implementação.

Durante o desenvolvimento desta pesquisa, as etapas descritas anteriormente serão seguidas tanto quanto possível. As etapas 1 e 2 já foram explicitadas ao longo do texto. Entretanto, o sistema a ser simulado será definido para a realização do experimento, pois se trata de um estudo teórico. As etapas 3 e 4 serão apresentadas no capítulo seguinte. A descrição do modelo de simulação, etapa 5, é mostrada no Apêndice A, ao final do texto. As etapas 6 e 7 também serão realizadas no Capítulo 4. O capítulo 5 apresentará as demais etapas, que compreendem, o planejamento dos experimentos e a definição de cenários, e por fim a análise dos resultados. A etapa 12, implementação, não será realizada, uma vez que o sistema simulado é teórico.

4 MODELAGEM

Nesse capítulo, o sistema considerado e cada um dos seus processos são explicados em detalhes. Em seguida, o sistema será definido de forma conceitual, através de fluxogramas de processo. Por fim, a validação do modelo é apresentada. A implementação do modelo utilizando a linguagem do software Arena é apresentada no Apêndice A.

4.1 DESCRIÇÃO DO SISTEMA

Nessa seção, vários aspectos do sistema a ser simulado são explicados: a geração de demanda, a colocação dos pedidos, o critério para o sequenciamento de produção e o dimensionamento dos estoques. A descrição do sistema será utilizada para definição da lógica do modelo de simulação.

4.1.1 Visão geral do sistema

O sistema é composto por um fornecedor responsável pelo abastecimento de um cliente externo, conforme ilustra a Figura 4.1.

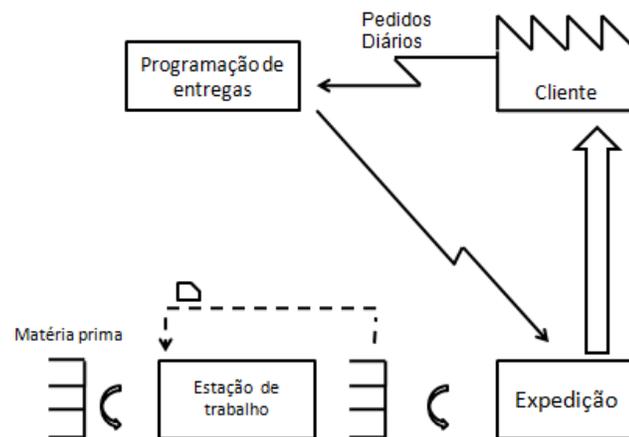


Figura 4.1 – Sistema considerado na simulação.

O processo de produção do fornecedor é realizado por uma estação de trabalho, controlada por um sistema kanban de cartão simples. Não é necessário utilizar um sistema de cartão duplo, uma vez que as retiradas de material serão realizadas nas quantidades necessárias, sendo definidas pelo cliente externo. Considera-se que a matéria prima necessária para a produção de todos os produtos sempre estará disponível. O cliente demanda diariamente um mix de 10 produtos diferentes, todos produzidos na mesma estação de trabalho. Após a produção, os produtos são mantidos num supermercado, de forma que atendimento ao cliente depende da disponibilidade do produto quando os pedidos forem recebidos, o que corresponde a um sistema *make-to-stock*. Se não houver disponibilidade do produto em estoque, a venda será perdida (total ou parcialmente).

Diariamente, os pedidos são enviados ao fornecedor, que utiliza seu estoque de produtos para atender o cliente. Quando o estoque é consumido, cartões kanban retornam a um quadro que sinaliza as prioridades de produção. Para definir as necessidades de produção, será utilizado um quadro kanban com 3 cores (verde, amarelo e vermelho), seguindo o modelo apresentado no Capítulo 2. O fornecedor deverá então repor os estoques consumidos, para que os pedidos do dia seguinte possam ser atendidos.

A estação será responsável pela produção de todos os produtos do mix, sendo que existe um tempo de preparação (*setup*) da estação de trabalho para trocar de um

produto para outro. O tempo de *setup* apresenta uma aleatoriedade dada por uma distribuição triangular simétrica, cujo valor mais médio é 8 minutos e os valores mínimo e máximo de 6 e 10 minutos, respectivamente. O tempo de *setup* é igual para todos os produtos.

O tempo de produção dos produtos também apresenta aleatoriedade, definido por uma distribuição triangular simétrica, cujos valores máximo e mínimo variam 10% em relação a média. Essas características representam a produção de produtos de uma mesma família, cujo processo é bastante semelhante. Dessa forma, o tempo de produção será aproximadamente proporcional a quantidade de *containers* produzidos para cada produto, além da realização de um *setup*.

Por fim, vale destacar que assim como o estoque de cada produto é consumido *container a container*, a reposição dos estoques acontece da mesma forma, sempre em múltiplos de um *container*.

4.1.2 Geração da demanda

A demanda do cliente para cada um dos 10 produtos varia, sendo representada por uma distribuição triangular simétrica, conforme mostrado pela Figura 4.2. A demanda de cada produto, definida diariamente, é independente de sua demanda no dia anterior e também da demanda dos demais produtos no dia correspondente (são variáveis aleatórias independentes).

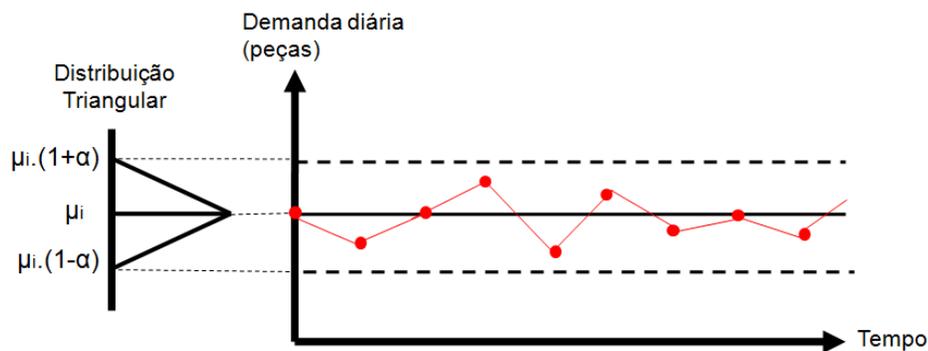


Figura 4.2 - Definição da demanda – distribuição triangular simétrica.

A Figura 4.2 mostra um produto com demanda média igual a μ_i ($i=1,2,\dots,10$) peças por dia, com variação de α . Dessa forma, este produto poderá apresentar qualquer valor de demanda entre $\mu_i \cdot (1 + \alpha)$ e $\mu_i \cdot (1 - \alpha)$, de forma que α representa uma variação percentual em relação a média da distribuição triangular simétrica. O nível de variação da demanda α é uma das variáveis do experimento, de forma que $0 < \alpha < 1$, sendo o mesmo para todos os produtos.

A distribuição triangular de probabilidade, utilizada para definir a demanda diária, descreve variáveis contínuas, ainda que a demanda de peças deva ser apresentada somente em valores inteiros. Mais adiante, como será descrito, o valor pedido diariamente ao fornecedor será arredondado, de forma a eliminar esta incompatibilidade em relação à natureza da variável.

Duas considerações adicionais devem ser realizadas a respeito da demanda. A primeira, é que a média da demanda de cada produto não é alterada ao longo do tempo, da mesma forma que a variação de demanda α . Trata-se, portanto, de um processo estacionário. A segunda é que a demanda total do cliente é definida pela soma da demanda de todos os produtos, definida aleatoriamente e de forma independente entre si. Dessa forma, haverá flutuação na demanda total diária.

De acordo com Duggan (2002), somente os produtos com alto consumo e/ou alta frequência de consumo devem ser controlados por um sistema kanban. Dessa forma, nenhum dos 10 itens considerados possui demanda esporádica ou incerta. Os itens podem ser divididos em 3 grupos bem definidos, em função da demanda

diária média: maiores volumes (A, B, C), menores volumes (H, I, J) e um grupo intermediário (D, E, F, G).

As demandas diárias médias de cada um dos produtos são apresentadas na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Demanda diária média de cada produto.

Produto	Demanda diária média (em peças)
A	240
B	240
C	240
D	160
E	160
F	160
G	160
H	80
I	80
J	80
Total	1600

4.1.3 Colocação e atendimento dos pedidos

Definida a demanda do cliente, os pedidos devem ser enviados ao fornecedor. Entretanto, a quantidade de peças deve ser múltiplo de 20 peças, já que este é o tamanho do *container* padrão produzido pelo fornecedor. Dessa forma, os pedidos serão sempre enviados em termos de quantidade de *containers* de cada produto.

Uma vez que os pedidos do cliente são atendidos somente em quantidade de *containers*, mas sua demanda é definida por uma variável contínua que pode assumir qualquer valor, poderá haver um saldo de peças no estoque do cliente de

um dia para o outro sempre que o número de containers pedido for arredondado para cima. Para atender sua demanda, o cliente poderá utilizar peças em seu estoque, se houver. Entretanto, esta quantidade de peças será sempre inferior a 20 unidades, fazendo com que uma ‘necessidade líquida’ deva ser calculada. A necessidade líquida do produto i , no período j , é definida pela eq.(4.1).

$$\text{Necessidade líquida}_{(i,j)} = \text{Demanda}_{(i,j)} - \text{Saldo em estoque}_{(i,j-1)} \quad (4.1)$$

Definida a necessidade líquida para cada produto no período, a quantidade de *containers* de cada produto que irá compor o pedido deverá ser calculada, de acordo com a eq.(4.2). O resultado da eq.(4.2) é arredondado para cima, visando atender toda a demanda do cliente no período. Portanto, o cliente poderá receber uma quantidade de peças ligeiramente superior a sua necessidade líquida do produto, devido ao arredondamento da quantidade de *containers* realizado, gerando um saldo em estoque deste produto disponível para o dia seguinte.

$$\text{Quantidade de containers}_{(i)} = \begin{cases} 0, & \text{se Necessidade líquida}_{(i,j)} = 0 \\ \text{Inteiro (Necessidade líquida}_{(i,j)} - 1 / 20) + 1 & \end{cases} \quad (4.2)$$

O pedido, em quantidade de *containers* de cada produto, será enviado ao fornecedor diariamente, sempre no início do dia.

Recebido o pedido, ele é enviado para a expedição. Para que este seja atendido, os produtos deverão estar disponíveis no supermercado. Quando isso ocorrer, *containers* são retirados do estoque na quantidade correspondente e enviados ao cliente.

Quando a quantidade de *containers* de um produto no supermercado for inferior a quantidade de *containers* pedidos pelo cliente, o pedido será atendido parcialmente

até o limite de sua disponibilidade e a demanda não atendida é considerada como perda de venda, sem a possibilidade de atendimento com atraso. Assim, a possibilidade do uso de um *buffer* de tempo não está sendo considerada. O nível de serviço será contabilizado considerando a quantidade de *containers* enviados ao cliente dividido pela quantidade total de *containers* pedidos pelo cliente ao longo do período simulado.

Para cada *container* retirado do supermercado e enviado ao cliente, o cartão kanban correspondente será destacado, sinalizando a necessidade de reposição para a estação de trabalho.

4.1.4. Definição da capacidade de produção da estação de trabalho

A definição da capacidade da estação de trabalho deve ser realizada, já que esta é uma das variáveis do experimento, podendo assumir diversos valores. Para dimensionar a capacidade, serão definidos alguns níveis de utilização da capacidade, calculados pela eq.(4.3). Para esse dimensionamento, será considerado que somente um setup por produto será realizado por dia, e que o tempo gasto nessa atividade permanece fora do cálculo realizado a seguir.

$$\text{Utilização} = \text{Demanda média (em peças)} / \text{Capacidade média (em peças)} \quad (4.3)$$

Os níveis de utilização a serem simulados são mostrados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Níveis de utilização da capacidade previstos no experimento.

Cenário	Utilização da capacidade (%)
1	100,00%
2	96,00%
3	92,00%
4	88,00%
5	84,00%
6	80,00%
7	76,00%

Como a demanda diária média de todos os produtos não será alterada a longo do tempo, para que a utilização da capacidade possua diversos valores a capacidade deve ser alterada. A capacidade da estação de trabalho será calculada pela eq.(4.4). A demanda diária média de todos os produtos é de 1600 peças.

$$\text{Utilização} = \text{Demanda média (em peças)} / \text{Capacidade média (em peças)}$$

$$\text{Capacidade média} = \text{Demanda média (em peças)} / \text{Utilização (\%)}$$

$$\text{Capacidade média} = 1600 \text{ peças} / \text{Utilização (\%)} \quad (4.4)$$

Assim, a capacidade média da estação de trabalho, em cada um dos cenários, é apresentada pela Tabela 4.3.

Tabela 4.3 - Capacidade média de produção da estação de trabalho em cada cenário a ser simulado.

Cenário	Utilização da capacidade (%)	Capacidade média (pçs/dia)
1	100,00%	1.600
2	96,00%	1.667
3	92,00%	1.739
4	88,00%	1.818
5	84,00%	1.905
6	80,00%	2.000
7	76,00%	2.105

Considerando que o tempo disponível para produção será de 8 horas (sem considerar horas extras), é possível calcular o tempo de ciclo por peça, de acordo com a eq.(4.5).

Tempo de ciclo (segundos)

$$= \text{Tempo disponível (segundos)} / \text{Capacidade média (peças)} \quad (4.5)$$

Além disso, o tempo de ciclo por *container* de 20 peças pode ser calculado, conforme a eq.(4.6).

Tempo de ciclo por container (minutos)

$$= \text{Tempo de ciclo por peça (segundos)} \times 20 / 60 \quad (4.6)$$

Os resultados destes cálculos são mostrados na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 - Tempos de ciclo por peça e por container para cada nível de utilização.

Utilização da capacidade (%)	Capacidade média (pçs/dia)	Tempo de ciclo por peça (s)	Tempo de ciclo por container (min)
100,00%	1.600	15,0	5,0
96,00%	1.667	14,4	4,8
92,00%	1.739	13,8	4,6
88,00%	1.818	13,2	4,4
84,00%	1.905	12,6	4,2
80,00%	2.000	12,0	4,0
76,00%	2.105	11,4	3,8

4.1.5 Sequenciamento da produção e reposição dos estoques

Os cartões kanban sinalizam as necessidades de produção, uma vez que retornam ao quadro. Nas situações em que os cartões ocuparem as faixas amarela ou vermelha do quadro, a produção será priorizada. O tamanho do lote de produção é fixo e igual ao tamanho da faixa verde de cada produto. O dimensionamento da quantidade de cartões no sistema será mostrado mais adiante.

Diariamente, poderá haver necessidade de reposição de mais de um produto. Os produtos cujo estoque esteja na faixa vermelha terão prioridade, para só então priorizar os produtos cujo estoque esteja na faixa amarela. Produtos cujo estoque esteja na faixa verde não serão incluídos no sequenciamento. Se dois ou mais produtos estiverem na faixa vermelha, terá prioridade o produto que apresentar menor tempo de cobertura de estoque, o que pode ser definido pela observação do quadro kanban. O mesmo raciocínio é utilizado quando dois ou mais produtos estiverem na faixa amarela. Se a produção de um lote padrão não for suficiente para que o estoque do produto retorne a faixa verde de quadro, um lote padrão adicional

será incluído no sequenciamento. A priorização descrita constitui um primeiro sequenciamento de produção.

Após a produção de todos os lotes definidos no primeiro sequenciamento, haverá cartões somente na faixa verde do quadro para todos os produtos. Se a estação de trabalho possuir tempo disponível, um segundo sequenciamento será realizado, visando eliminar os cartões restantes do quadro. Diferentemente do primeiro sequenciamento descrito, o tamanho do lote de produção do segundo sequenciamento de cada produto poderá variar. O tamanho do lote será igual a quantidade de cartões remanescentes no quadro para cada produto, desde que o tempo disponível seja suficiente para sua conclusão. Se não houver tempo suficiente, o lote de produção será reduzido. Não serão geradas horas extras visando a reposição de produtos que já estejam na faixa verde. Da mesma forma descrita no primeiro sequenciamento, se existir mais de um produto na faixa verde para ser produzido, a prioridade é dada ao produto com menor tempo de cobertura disponível.

Uma situação adicional poderá ser verificada. Caso o período de horas extras já tenha sido utilizado no dia, visando a reposição de estoques nas faixas vermelha e amarela, e se em seguida só existirem produtos na faixa verde de estoque, o segundo sequenciamento descrito será realizado visando a utilização do tempo disponível.

Nenhum produto pode ser produzido se não houver um cartão sinalizando a necessidade. Caso não exista nenhum cartão no quadro, a estação de trabalho encerrará sua atividade no dia, mesmo que isso gere ociosidade.

4.1.6 Dimensionamento da quantidade de kanbans

O dimensionamento será realizado de acordo com o método proposto por Tardin (2001), descrito em detalhes na Seção 2.1.4. A aplicação do método de dimensionamento dos cartões kanban será mostrada a seguir, onde é definida a quantidade total de cartões de cada produto pela soma de 3 parcelas, denominadas faixas verde, amarela e vermelha. O cálculo e o resultado de cada uma das faixas será mostrado mais adiante.

Para definir o tamanho da faixa verde, é necessário primeiro realizar uma análise de capacidade agregada. O resultado da análise de capacidade permite avaliar qual o tempo disponível para a realização de setups na estação de trabalho e, portanto, pode-se definir qual a quantidade de trocas que podem ser realizadas no período. O tamanho da faixa verde de cada produto é igual ao tamanho do lote de produção padrão, sendo calculado pela eq.(4.7).

$$\text{Faixa verde} = \text{Demanda média} / \text{Número de setups realizados} \quad (4.7)$$

Considera-se que a estação de trabalho opera somente em um turno de 8 horas, e que não existe perda de eficiência no processo. O número de setups realizados deve respeitar a capacidade necessária para o atendimento à demanda. Os resultados são mostrados na Tabela 4.5.

Como pode ser visto, calcula-se o tempo líquido disponível, e os tempos previstos necessários para a produção de todos os produtos e a realização de setups. O resultado da utilização mostra que a estação de trabalho pode realizar no máximo 10 setups por dia, caso contrário a capacidade será inferior a 1600 peças por dia (desconsiderando a possibilidade de se realizar horas extras). Assim, somente 1 setup pode ser realizado para cada produto diariamente, de forma que os lotes de produção terão tamanho igual a demanda diária média de cada produto. A análise

de capacidade mostrada prevê utilização da estação de trabalho de 100%, o que poderia gerar perdas no processo e não atendimento ao cliente devido à variação dos tempos de processo e setup existentes. Dessa forma, horas extras poderão ser realizadas sempre que necessário, visando eliminar o problema e atuando como um *buffer* de capacidade.

Em cenários com maior nível de capacidade, um maior número de setups poderia ser realizado, com a produção de lotes menores. Essa possibilidade é prevista pelo próprio método de dimensionamento. Entretanto, em todos os cenários a serem simulados, o tamanho do lote de produção padrão de cada produto (faixa verde) será o mesmo e igual a demanda média de um dia.

Tabela 4.5 - Análise de capacidade para definição da faixa verde.

Tempo diário total	1440	minutos	
Tempo não trabalhado	960	minutos	(-)
Tempo total trabalhado	480	minutos	
Tempo em paradas	0	minutos	(-)
Tempo líquido disponível	480	minutos	
Tempo médio de setup	8	minutos	
Número de setups / dia	10	setups	(x)
Tempo total de setup / dia	80	minutos	
Tempo disponível para produção	400	minutos	
Tempo médio de processo	0,25	minutos / peças	(÷)
Capacidade diária	1600	peças	
Demanda diária média	1600	peças	
Capacidade diária	1600	peças	(÷)
Utilização prevista	100%	%	

Realizada a análise de capacidade e a definição do número de setups, a faixa verde de todos os produtos pode ser calculada. Os resultados são apresentados na Tabela 4.6.

Tabela 4.6 - Dimensionamento da faixa verde para todos os produtos.

Produto	Demanda diária média (em peças)	Faixa verde (em peças)	Faixa verde (em cartões)	Tamanho padrão dos lotes de produção (em cartões)
A	240	240	12	12
B	240	240	12	12
C	240	240	12	12
D	160	160	8	8
E	160	160	8	8
F	160	160	8	8
G	160	160	8	8
H	80	80	4	4
I	80	80	4	4
J	80	80	4	4
Total	1600	1600	80	80

Após a faixa verde ser definida, a faixa amarela deve ser calculada. A faixa amarela corresponde a demanda de cada produto durante o tempo necessário para reposição. Nos casos em que o abastecimento de um cliente externo é realizado ou quando a demanda do cliente não ocorre de forma nivelada (sendo essa a situação verificada no sistema), a faixa amarela deve corresponder ao tamanho das retiradas do cliente. O cálculo da faixa amarela é definido pela eq.(4.8).

$$\begin{aligned} \text{Faixa amarela} &= \text{Tamanho das retiradas do cliente} \\ &= \text{Demanda diária média} \quad (4.8) \end{aligned}$$

Assim, os resultados do cálculo da faixa amarela para todos os produtos são apresentados na Tabela 4.7. Considera-se que o tamanho das retiradas é igual a demanda diária média.

Tabela 4.7 - Dimensionamento da faixa amarela para todos os produtos.

Produto	Demanda diária média (em peças)	Faixa amarela (em peças)	Faixa amarela (em cartões)
A	240	240	12
B	240	240	12
C	240	240	12
D	160	160	8
E	160	160	8
F	160	160	8
G	160	160	8
H	80	80	4
I	80	80	4
J	80	80	4
Total	1600	1600	80

Por fim, a faixa vermelha, que representa o estoque de segurança, deve ser dimensionada. O estoque de segurança normalmente é utilizado devido a incertezas no fornecimento, variação de demanda, histórico de quebras de máquina, etc. A faixa vermelha é calculada pela eq.(4.9).

$$\text{Faixa vermelha} = \text{Tempo de proteção (em dias)} \times \text{Demanda diária} \quad (4.9)$$

Considerando o tempo de proteção de 2 horas (0,25 dias), em função das variações existentes no tempo de produção e do tempo de setup da estação de trabalho, os resultados do dimensionamento da faixa vermelha podem ser observados na Tabela 4.8.

Tabela 4.8 - Dimensionamento da faixa vermelha para todos os produtos.

Produto	Demanda diária média (em peças)	Faixa vermelha (em peças)	Faixa vermelha (em cartões)	Estoque total (em peças)
A	240	60	3	540
B	240	60	3	540
C	240	60	3	540
D	160	40	2	360
E	160	40	2	360
F	160	40	2	360
G	160	40	2	360
H	80	20	1	180
I	80	20	1	180
J	80	20	1	180
Total	1600	400	20	3600

Assim, o estoque total de cada produto pode ser visto Tabela 4.9.

Tabela 4.9 - Estoque total para todos os produtos, de acordo com dimensionamento realizado.

Produto	Faixa verde (em cartões)	Faixa amarela (em cartões)	Faixa vermelha (em cartões)	Estoque total (em cartões)
A	12	12	3	27
B	12	12	3	27
C	12	12	3	27
D	8	8	2	18
E	8	8	2	18
F	8	8	2	18
G	8	8	2	18
H	4	4	1	9
I	4	4	1	9
J	4	4	1	9
Total	80	80	20	180

Entretanto, devido ao fato de que em alguns cenários um maior nível de capacidade de produção estará disponível, e que parte das causas que exigiriam a existência do estoque de segurança não ser verificada, poderá ocorrer de o sistema ser capaz de operar com um estoque menor do que o dimensionamento realizado, e ainda assim fornecer o nível de serviço desejado. Este é o comportamento esperado se o *trade-off* apresentado pelo triângulo de processos descrito por Klassen e Menor (2007) for verificado. Assim, as faixas amarela e vermelha de todos os produtos possuirão valor inicial ZERO, sendo que o estoque total será aumentado a cada vez em que o modelo de simulação for executado e o nível de serviço desejado não for atingido.

Inicialmente, a faixa amarela será aumentada, tendo como máximo o dimensionamento descrito anteriormente. A faixa vermelha permanecerá com valor zero. Se a faixa amarela atingir o valor definido no dimensionamento e o sistema ainda assim não fornecer o nível de serviço desejado, a faixa vermelha será aumentada até que o nível de serviço desejado seja obtido. Assim, o dimensionamento do estoque utilizado em cada cenário NÃO SERÁ DEFINIDO PELO MÉTODO DESCRITO, MAS POR SUCESSIVAS SIMULAÇÕES. Os limites de dimensionamento serão respeitados. A situação inicial do estoque de cada produto pode ser vista na Tabela 4.10, considerando o critério apresentado.

Tabela 4.10 - Situação inicial do nível dos estoques.

Produto	Demanda diária média (em peças)	Faixa verde (em cartões)	Faixa amarela (em cartões)	Faixa vermelha (em cartões)	Estoque total (em cartões)	Tempo de cobertura do estoque (em dias)
A	240	12	0	0	12	1
B	240	12	0	0	12	1
C	240	12	0	0	12	1
D	160	8	0	0	8	1
E	160	8	0	0	8	1
F	160	8	0	0	8	1
G	160	8	0	0	8	1
H	80	4	0	0	4	1
I	80	4	0	0	4	1
J	80	4	0	0	4	1
Total	1600	80	0	0	80	1,00

Quando for necessário aumentar o estoque devido ao nível de serviço ser menor do que o requerido, o aumento será proporcional a demanda de cada produto. Dessa forma, pretende-se que os tempos de cobertura de estoque de todos os produtos permaneçam iguais entre si. Assim, cada aumento de estoque será realizado no valor de 3 *containers* para os produtos A, B e C, 2 *containers* para os produtos D, E, F e G, e por fim, 1 *container* para os produtos H, I e J. De acordo com este critério, a Tabela 4.11 apresenta a situação em que a quantidade total de cartões é ligeiramente maior do que a situação inicial mostrada na Tabela 4.10, devido ao aumento dos cartões na faixa amarela de todos os produtos. A faixa vermelha só deixará de possuir valor ZERO quando a faixa amarela atingir o valor dimensionado apresentado anteriormente. A Tabela 4.12 apresenta o estoque de cada parcela e o estoque total na situação hipotética em que a faixa vermelha iniciaria sua utilização.

Tabela 4.11 - Dimensionamento dos estoques ligeiramente superior a situação inicial.

Produto	Demanda diária média (em peças)	Faixa verde (em cartões)	Faixa amarela (em cartões)	Faixa vermelha (em cartões)	Estoque total (em cartões)	Tempo de cobertura do estoque (em dias)
A	240	12	3	0	15	1,25
B	240	12	3	0	15	1,25
C	240	12	3	0	15	1,25
D	160	8	2	0	10	1,25
E	160	8	2	0	10	1,25
F	160	8	2	0	10	1,25
G	160	8	2	0	10	1,25
H	80	4	1	0	5	1,25
I	80	4	1	0	5	1,25
J	80	4	1	0	5	1,25
Total	1600	80	20	0	100	1,25

Tabela 4.12 - Dimensionamento dos estoques ilustrando o uso da faixa vermelha.

Produto	Demanda diária média (em peças)	Faixa verde (em cartões)	Faixa amarela (em cartões)	Faixa vermelha (em cartões)	Estoque total (em cartões)	Tempo de cobertura do estoque (em dias)
A	240	12	12	3	27	2,25
B	240	12	12	3	27	2,25
C	240	12	12	3	27	2,25
D	160	8	8	2	18	2,25
E	160	8	8	2	18	2,25
F	160	8	8	2	18	2,25
G	160	8	8	2	18	2,25
H	80	4	4	1	9	2,25
I	80	4	4	1	9	2,25
J	80	4	4	1	9	2,25
Total	1600	80	80	20	180	2,25

Uma observação importante deve ser realizada, em relação ao dimensionamento definido. Ainda que os limites de cada faixa sejam calculados pelo método descrito por Tardin (2001), pode ser observado que o valor inicial do estoque de cada produto seria o mesmo para qualquer um dos 3 métodos de dimensionamento apresentados no Capítulo 2, desde que os parâmetros de segurança e variações sejam desconsiderados do cálculo. As simplificações do sistema, eliminação de perdas e de variação de demanda nos cenários iniciais permitem desconsiderar esses parâmetros. Dessa forma, entende-se que o valor definido como ESTOQUE INICIAL estabelece de forma eficiente a quantidade mínima necessária para que o sistema possa operar. Uma quantidade adicional de peças só será incluída se necessário, e em pequenas quantidades, de acordo com o critério estabelecido nessa seção.

4.2 LÓGICA DO MODELO DE SIMULAÇÃO

O modelo será representado por dois processos básicos. Um deles, responsável pela geração da demanda e atendimento dos pedidos. O segundo, pelo processo de produção e reposição dos estoques. Os dois processos são explicados a seguir.

4.2.1 Geração da demanda e atendimento dos pedidos

A Figura 4.3 mostra a lógica do processo de geração da demanda e atendimento dos pedidos em detalhes. A lógica mostrada explica o processo para cada um dos produtos, sendo que as demandas de cada um deles são independentes entre si. Como pode ser observado, o primeiro passo é a definição da demanda diária através de uma variável aleatória.

Após a definição da demanda, o número de *containers* pedidos é calculado, uma vez que pode existir saldo do produto no estoque do cliente. O pedido é enviado sempre em múltiplos da quantidade de peças por *container*.

O pedido enviado pode ser atendido completamente ou não, em função dos estoques disponíveis. Os estoques são reduzidos, uma vez que o pedido é recebido e atendido, e os cartões kanban são destacados dos *containers* e enviados ao quadro. Em seguida, pedidos atendidos e perdidos são contabilizados, sendo que pedidos não podem ser atendidos em atraso. Ao contabilizar o nível de serviço, o indicador irá considerar número de *containers* (de 20 peças) atendidos ou perdidos, como se cada um deles fosse um pedido separado.

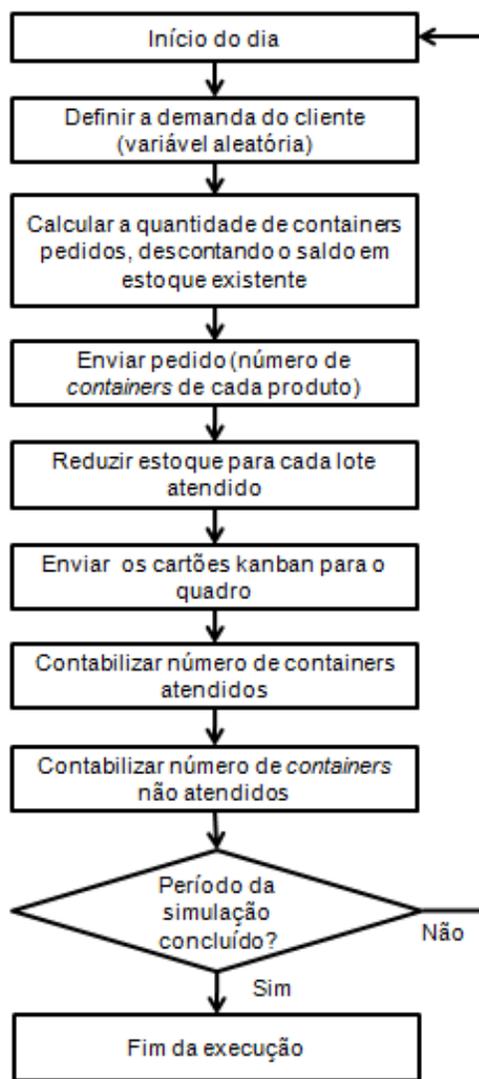


Figura 4.3 – Módulo de geração e atendimento da demanda.

4.2.2 Produção e reposição dos estoques

No início de cada dia, os pedidos são recebidos e atendidos, e os cartões são enviados ao quadro, sinalizando as prioridades de produção. Os produtos que

estiverem na faixa vermelha serão priorizados, seguidos pelos produtos que estiverem na faixa amarela. Nesse primeiro sequenciamento, os produtos que estiverem na faixa verde não serão incluídos, já que sua situação do estoque ainda não necessita reposição. A Figura 4.4 mostra o processo completo.

Após o primeiro sequenciamento, a produção de todos os produtos incluídos deve ser realizada. Horas extras serão realizadas sempre que o período normal de trabalho não for suficiente para que todos os produtos que estejam nas faixas vermelha e amarela sejam repostos, sempre considerando o tamanho do lote padrão, igual a faixa verde. Se o período de horas extras não for suficiente para a conclusão de todos os lotes incluídos no sequenciamento, o turno de trabalho é encerrado e o material permanece em processo na estação de trabalho. A produção será reiniciada no dia seguinte. Sob nenhuma hipótese o período disponível para produção será maior do que 10 horas diárias. Esse controle não é efetuado pela lógica apresentada, mas realizado pelo software de simulação, que permite definir quais os horários em que a estação de trabalho pode operar, e quais não.

Após a produção do primeiro sequenciamento ser concluída, o tempo disponível será verificado. Um novo sequenciamento poderá ser realizado para os produtos que estão na faixa verde do quadro, utilizando o tempo restante, desde que as 8 horas disponíveis não sejam ultrapassadas. Entretanto, se o período de horas extras já tiver sido parcialmente utilizado com o objetivo de concluir o primeiro sequenciamento de produção, o restante das 2 horas disponíveis será utilizado na produção dos produtos que estiverem na faixa verde.

Para utilizar o restante do tempo disponível após a conclusão do primeiro sequenciamento, o produto com menor tempo de cobertura de estoque será identificado. Verifica-se se existe tempo suficiente para realizar um setup. Se não houver, o turno de trabalho é encerrado. Se houver, um setup é realizado, e verifica-se se existe tempo para produzir um *container* do produto. Se não houver, o turno de trabalho é igualmente encerrado. Em caso positivo, a produção desse *container* será realizada, e novamente o tempo disponível será avaliado. A produção continuará a ser realizada até que todos os cartões do produto tenham sido retirados do quadro ou até que não haja mais tempo disponível, o que ocorrer primeiro. Se ainda houver tempo disponível após a eliminação de todos os cartões do quadro para este

produto, outro produto poderá ser priorizado considerando o menor tempo de cobertura dentre todos os produtos. Esse processo será repetido para todos os produtos ou até que o tempo disponível diário chegue ao fim. O turno de trabalho será encerrado, sendo iniciado novamente no dia seguinte, até que o período de simulação termine.

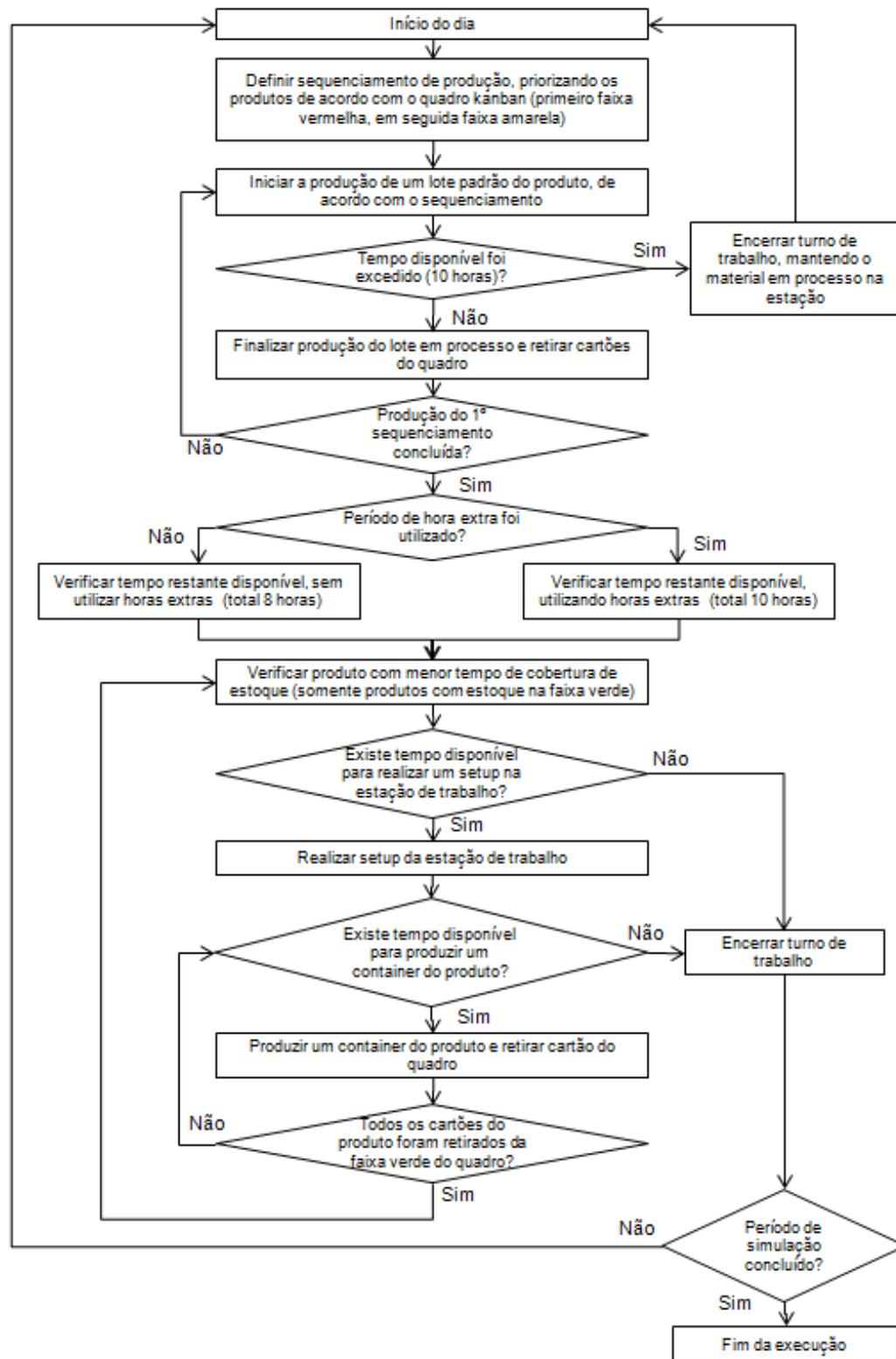


Figura 4.4 - Processo de produção e reposição dos estoques.

4.3 VALIDAÇÃO DO MODELO

O modelo de simulação desenvolvido está descrito de forma detalhada no Apêndice A, ao final do texto. Para que o modelo implementado seja considerado confiável, permitindo que a análise dos resultados e conclusões sejam consistentes, deve existir uma validação da implementação realizada.

Carson (2002) define que a validação de um modelo é um processo bastante complexo, que envolve várias etapas intercaladas de correção e análise. Inicialmente, deve existir uma etapa de depuração (*debugging*) e verificação da lógica de operação do modelo, com o objetivo básico de detectar erros na implementação e corrigi-los. Estando aparentemente correto, um modelo deve ser validado, o que normalmente é realizado juntamente com pessoas que conheçam o sistema real modelado.

Existem diversas técnicas para validação de um modelo, como afirma Sargent (2004), sendo as mais frequentemente utilizadas listadas a seguir:

- Observação da execução do modelo, de forma a mostrar se existe consistência com o sistema real simulado, podendo-se utilizar animação com este objetivo;
- Comparação com outros modelos anteriormente implementados e validados;
- Execução do modelo sob condições extremas, observando semelhança com o sistema real;
- Apresentação do modelo a pessoas diretamente envolvidas com o sistema a ser simulado;
- Utilizar dados históricos na simulação, comparando as saídas da execução com os resultados obtidos anteriormente;
- Teste de sensibilidade através da variação de parâmetros de entrada, e análise dos resultados e tendências.

A maior parte das técnicas apresentadas não pode ser utilizada nesse trabalho, uma vez que o modelo considerado foi criado para o experimento, e assim não existem pessoas envolvidas com o processo nem dados históricos. Portanto, apenas o teste de sensibilidade e a observação da execução podem ser realizados.

Carson (2002) apresenta um método mais simples de validação, constituído de 3 etapas:

- Testar a coerência dos resultados apresentados;
- Testar diferentes parâmetros do sistema (*stress test*);
- Comparar os resultados da simulação com os resultados do sistema real, ou ainda, analisar o comportamento e tendências das variáveis de um novo sistema;

As etapas de depuração (*debugging*) e verificação foram amplamente realizadas.

A observação da execução e animação da simulação, utilizando o software Arena, permitiu a verificação de algumas características descritas na explicação e modelagem do sistema considerado, citadas a seguir:

- A jornada de trabalho da estação é limitada, não havendo produção além do limite de 10 horas por dia (8 horas normais mais 2 horas extras), mesmo que o quadro apresente cartões nas faixas amarela e vermelha ao final do período; quando isso ocorre, o material em processo permanece na estação de trabalho.
- A reposição dos estoques só ocorre quando existirem cartões no quadro, devido a demanda e o consumo dos estoques; verificou-se que o estoque de nenhum dos produtos excedeu a quantidade total correspondente a quantidade de cartões existentes no sistema.
- A prioridade de produção é dada aos produtos que estejam na faixa vermelha, para só então priorizar os produtos que estejam na faixa amarela; caso dois ou mais

produtos estejam na mesma faixa do quadro, a prioridade é dada ao produto que tenha menor tempo de cobertura de estoque;

- Horas extras não foram geradas com o objetivo de se produzir produtos que estejam na faixa verde do quadro;

- Durante o período em que estação de trabalho permaneceria ociosa, sem gerar horas extras, a produção de produtos que estão na faixa verde ocorre, visando eliminar todos os cartões do quadro de cada produto; a produção de cada *container* adicional é avaliada em função do tempo disponível;

Além das constatações listadas, possibilitadas pela observação da execução do modelo, uma análise adicional foi realizada através de novas execuções. Nessa etapa, variáveis de entrada do modelo foram alteradas, permitindo a análise de resultados e tendências das variáveis de saída.

Inicialmente, a demanda de um produto foi monitorada diariamente, permitindo-se avaliar se seus valores oscilam, conforme requerido em cada cenário. A Figura 4.5 mostra a demanda diária do produto A na situação em que não existe variação de demanda (linha contínua) e quando a variação for de 20% (marcadores). Pode-se concluir que a variação é corretamente gerada, analisando a dispersão dos valores e os valores extremos superiores e inferiores gerados pela variável aleatória.

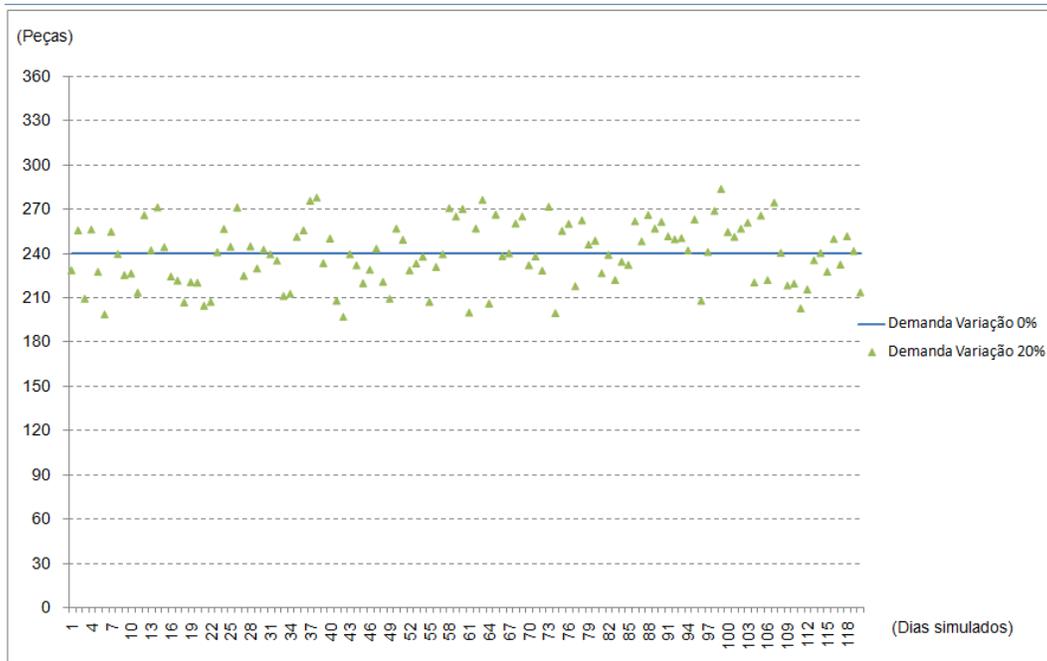


Figura 4.5 - Demandas diárias do produto A, quando não existe variação de demanda, ou quando a variação é de 20%.

De forma semelhante, quando se compara a demanda de um mesmo produto, sujeita a dois níveis de variação de demanda (20% e 40%), o aumento da dispersão dos valores para demanda de maior variação se torna evidente. A Figura 4.6 mostra os resultados. Em linhas contínuas, a demanda com variação de 20% é mostrada, e os marcadores mostram os valores de demanda com variação de 40%.

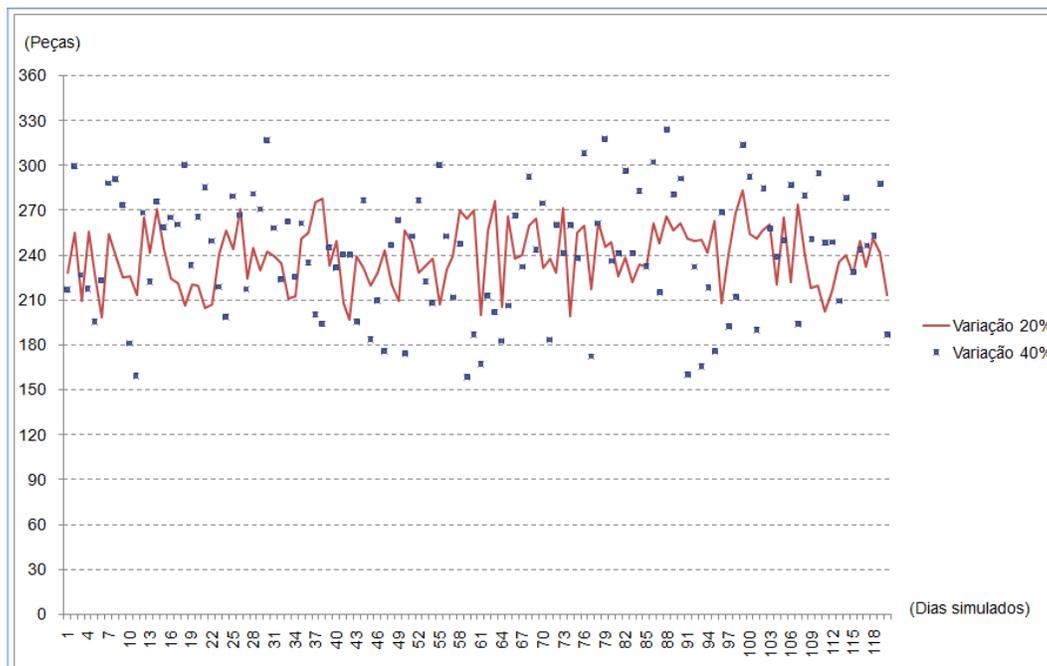


Figura 4.6 - Demandas diárias do produto A, quando existe variação de 20% e 40%.

Os valores de demanda do cliente mostrados pelas Figuras 4.5 e 4.6 são definidos por uma variável aleatória. Entretanto, a demanda percebida pelo fornecedor é verificada em número de *containers* pedidos, uma vez que pode existir um saldo de peças no estoque do cliente e um arredondamento do valor. A Figura 4.7 mostra o número de *containers* pedidos ao fornecedor diariamente. Novamente, utiliza-se a variação de demanda de 20% e 40%.

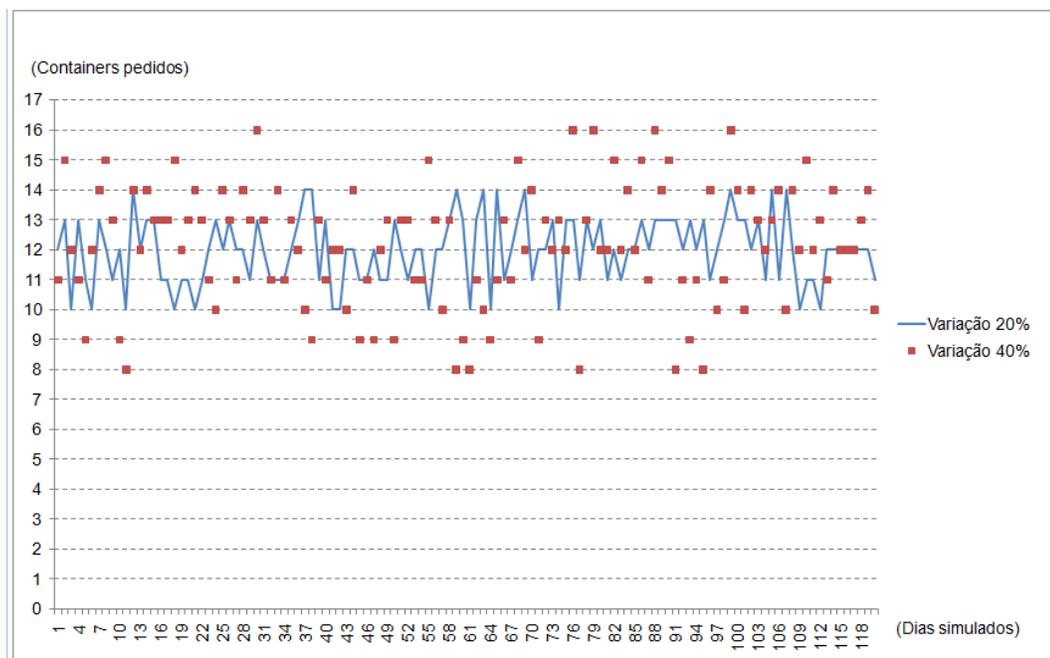


Figura 4.7 - Número de *containers* do produto A pedidos ao fornecedor diariamente, considerando variação de demanda de 20% e 40%.

A demanda e os pedidos enviados ao fornecedor para os demais produtos são gerados da mesma forma descrita anteriormente. Considerando os dados mostrados, pode-se concluir que o modelo gera os valores de demanda e número de pedidos satisfatoriamente, conforme a descrição do sistema e modelagem apresentados neste Capítulo. Pode-se verificar que a média diária de *containers* do produto A pedidos ao longo do período, para os dois níveis de variação, corresponde a demanda média do produto.

Os estoques existentes no fornecedor podem ser analisados de forma semelhante. Os dados mostrados a seguir consideram sempre a posição de estoque ao final de cada dia.

Devido a existência da variação no número de lotes pedidos, os estoques de cada produto poderão oscilar significativamente. Se não existe variação de demanda, os estoques permanecerão com valores constantes. A Figura 4.8 mostra os resultados. Pode-se observar ainda que o estoque correspondente a quantidade total de cartões (estoque máximo) nunca é excedido, o que também atesta adequação da implementação do modelo.

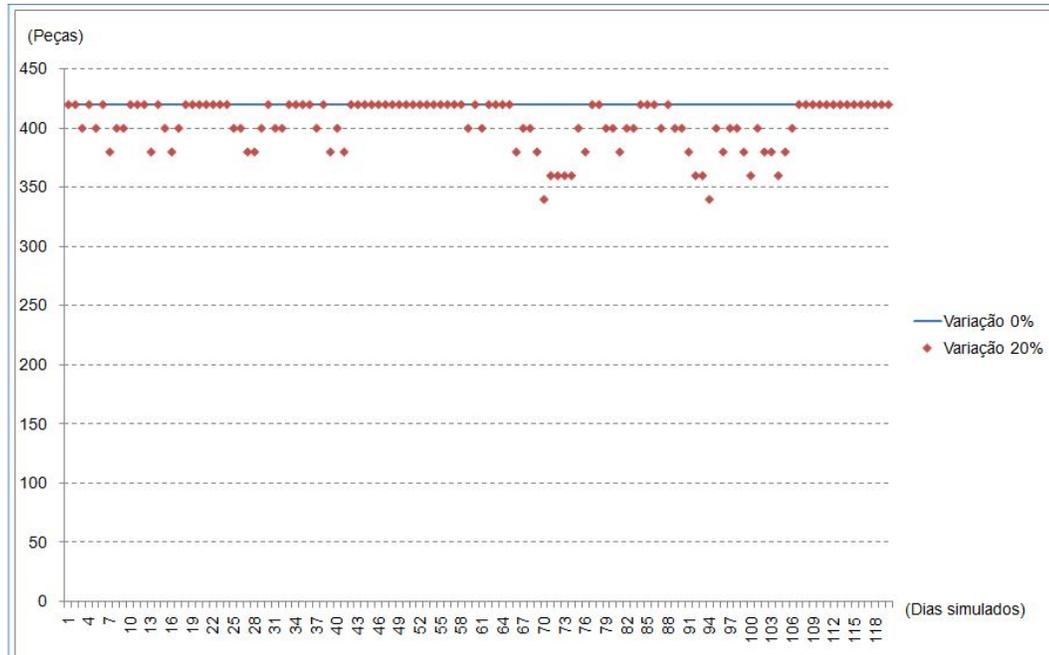


Figura 4.8 - Estoques do produto A medidos ao final de cada dia, considerando variação de demanda de 20% e ausência de variação de demanda.

Da mesma forma, se os estoques totais são observados, o efeito do aumento da variação da demanda se mostra evidente, conforme a Figura 4.9, que mostra a maior dispersão dos valores de estoque medidos ao final do dia. A soma dos estoques de todos os produtos não excede o estoque máximo dimensionado, cujo valor nesse caso é de 2800 peças.

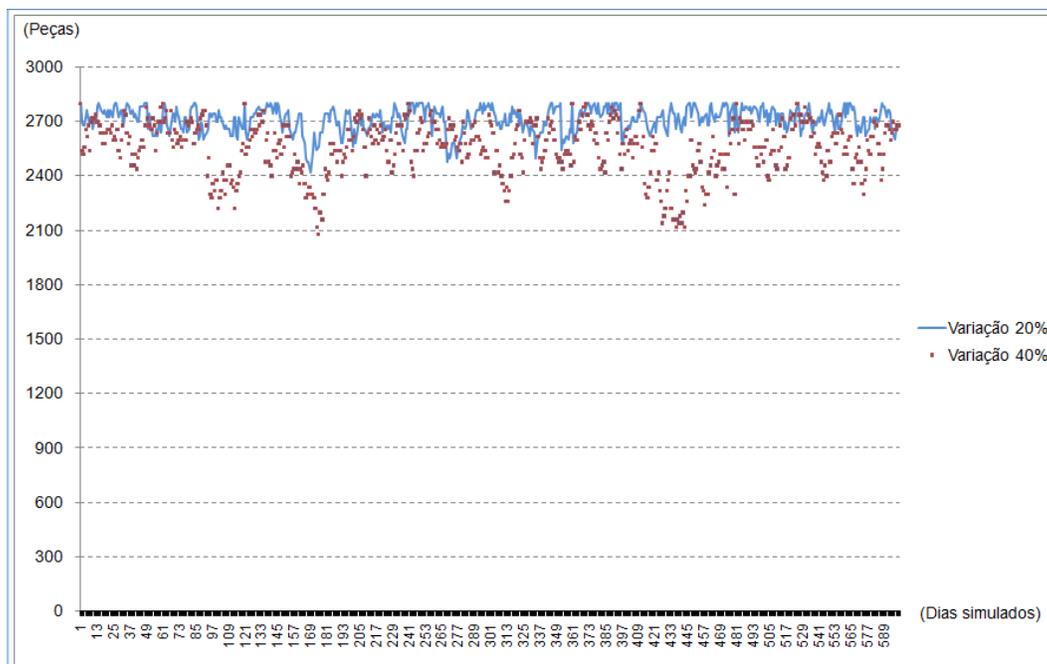


Figura 4.9 - Estoques totais do sistema medidos diariamente, sujeitos a variação de demanda de 20% e 40%.

Um último teste foi realizado, com o objetivo de observar o comportamento das variáveis de resposta em função da capacidade de produção da estação de trabalho. O modelo foi executado 3 vezes, mantendo o mesmo nível de variação de demanda e o dimensionamento de cartões. Porém, foram utilizados níveis de capacidade de produção bastante distintos entre si. Em um dos casos a capacidade de produção era insuficiente para atender a demanda média, mesmo considerando a realização de horas extras (capacidade de produção sem horas extras de 1000 peças / dia). No segundo caso, a capacidade de produção foi muito maior do que a demanda média (capacidade de produção sem horas extras de 5000 peças / dia). No terceiro caso, a capacidade dimensionada sem horas extras foi igual a demanda do cliente (capacidade de produção de 1600 peças / dia). Os estoques são medidos sempre ao final de cada dia.

A Figura 4.10 mostra os resultados. Pode ser observado que quando existir excesso de capacidade (capacidade de 5000 peças / dia), o estoque ao final do dia permanece completo. Quando a relação entre capacidade e demanda for estreita (capacidade de 1600 peças / dia), o estoque total está bastante sujeito as variações

no volume e mix. Quando a capacidade for de 1000 peças / dia (capacidade insuficiente), o estoque total terá uma queda brusca ao início da simulação, uma vez que a demanda é maior do que a capacidade disponível e os estoques são constantemente consumidos. O nível de estoque interrompe o movimento de queda quando parte significativa dos pedidos do cliente começa a ser perdida, devido a indisponibilidade de peças. Os dados obtidos nesse último teste não serão considerados como resultados válidos, já que seu objetivo é apenas verificar o comportamento do estoque (variável de saída), quando o sistema está sujeito a valores extremos de capacidade de produção (variável de entrada). Nesse caso, o nível de serviço obtido não foi considerado na análise.

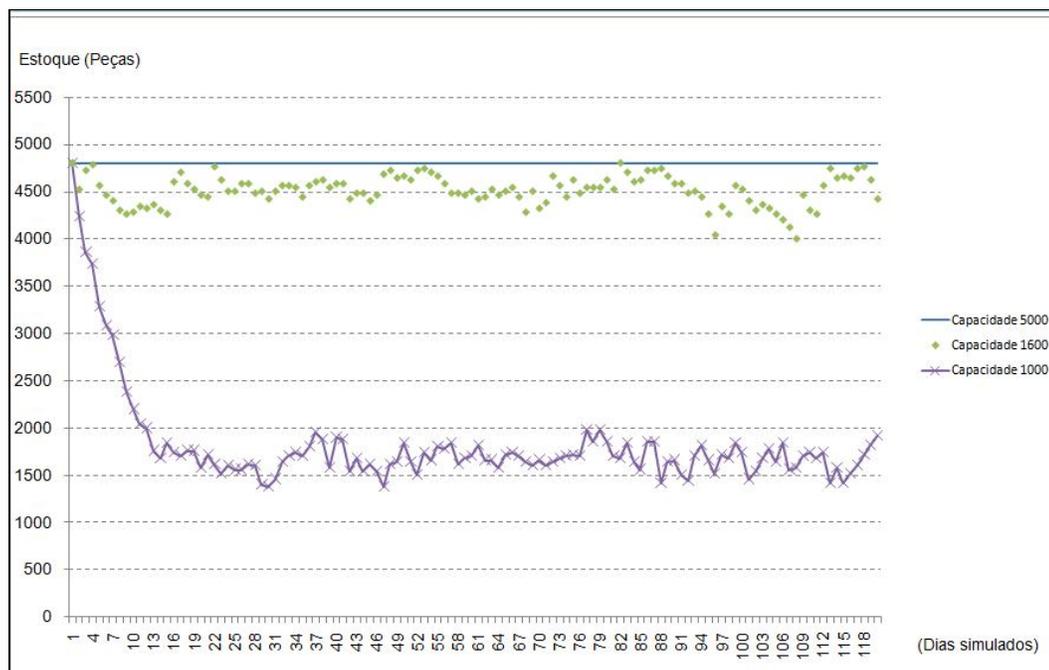


Figura 4.10 - Estoques totais medidos diariamente, sob diferentes níveis de capacidade da estação de trabalho.

Considerando a etapa inicial de correção do modelo, a observação de sua execução e os testes realizados que avaliam o comportamento e as tendências das variáveis de resposta, pode-se concluir que o modelo é válido, podendo ser utilizado para a realização do experimento.

5. RESULTADOS

O experimento proposto será explicado em detalhes nesse capítulo. Inicialmente, os cenários a serem simulados e o método de análise dos resultados são descritos. Por fim, os resultados da simulação de cada um dos cenários serão apresentados e discutidos.

5.1 PLANEJAMENTO DOS EXPERIMENTOS

Esta seção apresenta os cenários a serem simulados que compõem o experimento, e explica a forma como os resultados serão analisados e o método de análise de custo.

5.1.1 Definição dos cenários simulados

Os parâmetros do experimento foram definidos na seguinte sequência:

- Em primeiro lugar, o nível de variação α da demanda será definido, podendo assumir valores de 0, 10%, 20%, 30% e 40%. O valor de α não será alterado ao longo da simulação, sendo o mesmo para todos os produtos.

- Em segundo lugar, a capacidade de produção da estação de trabalho será ajustada, de forma que o nível de utilização do recurso varie entre 100% e 76% (100%, 96%, 92%, 88%, 84%, 80% e 76%). Para definir os níveis de capacidade (e assim, utilização), foram calculados tempos de ciclo para a produção de cada *container*, conforme mostrado na seção 4.1.6. Os níveis de utilização mostrados consideram somente o tempo de produção em horas normais, sem horas extras.

- Por fim, o nível de estoque total do sistema será calculado de forma iterativa, através de várias simulações. A cada simulação, o nível de serviço será avaliado, e caso seja menor do que 99,9%, o estoque de cada produto será aumentado, conforme critério que mantém o mesmo tempo de cobertura para todos os produtos, mostrado na seção 4.1.4. O processo será repetido até que o nível de serviço desejado seja obtido. Dessa forma, a soma do estoque máximo de todos os produtos é um parâmetro definido através de várias simulações, e o valor médio do estoque de todos os produtos, medido diariamente, é a variável de resposta do experimento.

Dessa forma, serão realizadas diversas simulações, de forma a definir o menor nível de estoque total capaz de fornecer o nível de serviço desejado, considerando 35 cenários que combinam diferentes níveis de variação de demanda e capacidade de produção. Todos os cenários a serem simulados são mostrados na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 - Cenários a serem simulados durante o experimento.

Cenário	Variação de demanda (%)	Capacidade de produção (pçs/dia)	Utilização da capacidade (%)
1	0%	1.600	100%
2	0%	1.667	96%
3	0%	1.739	92%
4	0%	1.818	88%
5	0%	1.905	84%
6	0%	2.000	80%
7	0%	2.105	76%
8	10%	1.600	100%
9	10%	1.667	96%
10	10%	1.739	92%
11	10%	1.818	88%
12	10%	1.905	84%
13	10%	2.000	80%
14	10%	2.105	76%
15	20%	1.600	100%
16	20%	1.667	96%
17	20%	1.739	92%
18	20%	1.818	88%
19	20%	1.905	84%
20	20%	2.000	80%
21	20%	2.105	76%
22	30%	1.600	100%
23	30%	1.667	96%
24	30%	1.739	92%
25	30%	1.818	88%
26	30%	1.905	84%
27	30%	2.000	80%
28	30%	2.105	76%
29	40%	1.600	100%
30	40%	1.667	96%
31	40%	1.739	92%
32	40%	1.818	88%
33	40%	1.905	84%
34	40%	2.000	80%
35	40%	2.105	76%

Para cada cenário, o modelo será executado em 5 replicações. Cada replicação terá um período de 6 meses (120 dias úteis), iniciando cada período com o estoque de todos os produtos totalmente completo. A observação da execução do modelo mostra que o período considerado na simulação é suficiente para que o comportamento das variáveis e dos resultados seja avaliado.

5.1.2 Método de análise dos resultados

As análises consideram os parâmetros de capacidade de produção, variação de demanda, e o estoque máximo de todos os produtos, porém este é definido através de várias simulações. Como variáveis de saída, considera-se o nível de serviço, o estoque total medido diariamente e o número de dias em que foram realizadas horas extras.

Após as simulações, os dados deverão ser analisados da seguinte forma:

- Considerando um mesmo nível de variação de demanda, a relação entre níveis de utilização (que representam diferentes níveis de capacidade) e estoques pode ser verificada (gráfico de utilização x estoques); o *trade-off* entre as variáveis deverá ser evidenciado; serão apresentados os níveis de estoque máximos, de acordo com o dimensionamento realizado, e também o estoque médio real medido ao final de cada dia, após a estação de trabalho realizar a reposição total ou parcial dos estoques;
- Considerando mesmos níveis de utilização da capacidade, a relação entre variação de demanda e estoques pode ser verificada (gráfico de variação de demanda x estoques); da mesma forma descrita anteriormente, o nível de estoque dimensionado e estoque real podem ser comparados;

A tendência verificada nos gráficos deverá confirmar o fato de que os *buffers* de estoque e capacidade são recursos substitutos com o objetivo de acomodar as variações de demanda, garantindo o nível de serviço desejado.

5.1.3 Método de análise de custo

Os parâmetros de capacidade, estoques e variação considerados nas simulações definem os resultados operacionais do modelo de simulação. Além destes resultados, é necessário analisar também o custo da operação dos diferentes cenários. Hopp & Spearman (2001) salientam que toda variação do sistema deve ser acomodada por algum tipo de 'proteção' (*buffer*), e que isso, de forma inevitável, implica em custo e que quanto maior o nível de variação, maior o custo necessário para que esta seja acomodada. Dessa forma, pode-se esperar uma elevação do custo total da operação a medida que a variação de demanda também aumente, independente de qual a relação entre capacidade e estoques definidos nas simulações. Essa situação será verificada comparando os custos mínimos da operação para nível de variação de demanda.

A seguir, a descrição do método de análise de custo é apresentada.

O custo total possui alguns componentes, podendo ser descrito pela eq.(5.2).

$$\begin{aligned} \text{Custo total} = & \text{Custo de estoque} + \text{Custo de produção em horas normais} + \\ & \text{Custo de produção em horas extras} \quad (5.2) \end{aligned}$$

considerando que o 'custo de produção em horas normais' corresponde ao custo durante as 8 primeiras horas produtivas de cada dia, e que o 'custo de produção em horas extras' corresponde às 2 horas adicionais que podem ser realizadas diariamente, quando necessário. O custo varia em função do nível de capacidade da estação de trabalho utilizado em cada cenário. O custo de vendas perdidas não está sendo considerado, uma vez que este será pouco relevante, devido ao fato de que o nível de serviço exigido é elevado.

Cada um dos componentes da eq.(5.2) pode ser ainda desdobrado nas eq.(5.3), eq.(5.4) e eq.(5.5).

$$\text{Custo de estoque} = \text{Estoque total} \times$$

$$\text{Custo diário de manutenção do estoque por peça} \times \text{Total de dias simulados} \quad (5.3)$$

O nível de estoque total é medido ao final de cada dia, correspondendo a soma dos estoques de todos os produtos. Considera-se que o custo diário por peça em estoque é igual para todos os produtos.

$$\text{Custo de produção em horas normais} = \text{Custo de produção por hora} \times$$

$$\text{Dias totais simulados} \times 8 \quad (5.4)$$

A constante '8' corresponde ao número de horas produtivas por turno normal.

$$\text{Custo de produção em horas extras} = \text{Custo de produção por hora} \times$$

$$\text{Número de dias com horas extras} \times 1,35 \times 2 \quad (5.5)$$

A constante '2' refere-se ao número de horas trabalhadas num dia em que horas extras forem realizadas. Já a constante '1,35' considera um aumento do custo de produção de 35% durante as horas extras, quando comparado ao custo de produção nas 8 horas normais de cada dia.

Devido ao fato de que as simulações serão realizadas com diferentes níveis de capacidade, o custo de produção por hora poderá variar. Considerando que o custo de produção por peça permanecerá o mesmo e igual a \$1 em todos os cenários, o custo de produção horário para cada um dos cenários será proporcional a

capacidade de produção, sendo mostrado na Tabela 5.2. Também são mostrados os custos de produção durante as horas extras, 35% maiores do que os custos de produção em turno normal.

Tabela 5.2 - Custo de produção por hora considerando diferentes níveis de capacidade.

Capacidade média (pçs/dia)	Custo de capacidade em turno normal (\$/dia)	Custo de produção em turno normal (\$/hr)	Custo de produção em hora extra (\$/hr)
1.600	1600	200	270
1.667	1667	208	281
1.739	1739	217	293
1.818	1818	227	307
1.905	1905	238	321
2.000	2000	250	338
2.105	2.105	263	355

Além dos custos de capacidade, que podem assumir diversos valores em função da capacidade de produção da estação de trabalho, serão consideradas diferentes relações de custo de estoque, visando analisar se as conclusões podem ser alteradas caso o custo dos estoques seja mais ou menos significativo. Os custos de estoque são mostrados na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 – Custos de estoque considerados na análise de custo.

Situação	Custo de estoque (\$ / peça / dia)
1	0,10
2	0,01
3	1,00

Conforme já citado por Garg; Vrat e Kanda (2001), a relação entre o custo de produção por peça e o custo de manutenção dos estoques pode variar em função do tipo de processo produtivo, podendo alterar significativamente os resultados em

termos de custo. Como dito, processos em que o custo de capacidade é muito intensivo, o custo dos estoques será menos representativo. Em casos em que os materiais representarem maior parte do custo, o aumento de capacidade poderá proporcionar reduções do custo operacional.

Através destas análises, as hipóteses propostas através de triângulo de processo, descrito por Klassen e Menor (2007), poderão ser verificadas, além da proposta deste estudo, que é a análise do uso da capacidade como forma de se criarem *buffers* (alternativa ao estoque de segurança), além de sua viabilidade econômica.

5.2 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Após a execução de todas as simulações, ajuste dos parâmetros e dimensionamento dos estoques que permitem o atendimento do nível de serviço necessário para cada cenário, os resultados podem ser apresentados. Os resultados de todos os cenários simulados são apresentados na Tabela 5.4. Para cada cenário, são mostrados os parâmetros de variação de demanda, capacidade de produção e utilização de capacidade, e também as variáveis de resposta, tais como o estoque médio medido diariamente, o estoque máximo dimensionado, o nível de serviço médio entre todas as replicações, maior ou igual a 99,9%, e o número médio de dias em que horas extras foram realizadas. O número total de dias simulados em cada replicação é de 120 dias.

Tabela 5.4 - Parâmetros e resultados de cada um dos cenários simulados.

Cenário	Variação de demanda (%)	Capacidade de produção (pçs/dia)	Utilização da capacidade (%)	Estoque médio (pçs)	Estoque max dimensionado	Nível de serviço médio (%)	Média de dias com hora extra
1	0%	1.600	100%	1.600	1.600	100,00	58,2
2	0%	1.667	96%	1.600	1.600	100,00	0,6
3	0%	1.739	92%	1.600	1.600	100,00	0
4	0%	1.818	88%	1.600	1.600	100,00	0
5	0%	1.905	84%	1.600	1.600	100,00	0
6	0%	2.000	80%	1.600	1.600	100,00	0
7	0%	2.105	76%	1.600	1.600	100,00	0
8	10%	1.600	100%	2.351	2.400	99,95	26,2
9	10%	1.667	96%	1.970	2.000	99,99	0,2
10	10%	1.739	92%	1.994	2.000	99,97	0
11	10%	1.818	88%	1.998	2.000	99,94	0
12	10%	1.905	84%	1.999	2.000	99,96	0
13	10%	2.000	80%	2.000	2.000	99,99	0
14	10%	2.105	76%	2.000	2.000	100,00	0
15	20%	1.600	100%	2.656	2.800	99,99	15,6
16	20%	1.667	96%	2.710	2.800	99,98	0
17	20%	1.739	92%	2.768	2.800	99,99	0
18	20%	1.818	88%	2.776	2.800	99,94	0
19	20%	1.905	84%	2.392	2.400	99,92	0
20	20%	2.000	80%	2.392	2.400	99,90	0
21	20%	2.105	76%	1.997	2.000	99,93	0
22	30%	1.600	100%	2.607	2.800	99,91	14,6
23	30%	1.667	96%	2.647	2.800	99,97	0
24	30%	1.739	92%	2.729	2.800	99,97	0
25	30%	1.818	88%	2.766	2.800	99,95	0
26	30%	1.905	84%	2.776	2.800	99,98	0
27	30%	2.000	80%	2.779	2.800	99,97	0
28	30%	2.105	76%	2.388	2.400	99,93	0
29	40%	1.600	100%	2.929	3.200	99,99	11
30	40%	1.667	96%	2.992	3.200	100,00	0,6
31	40%	1.739	92%	2.691	2.800	99,97	0
32	40%	1.818	88%	2.732	2.800	99,95	0
33	40%	1.905	84%	2.757	2.800	99,96	0
34	40%	2.000	80%	2.768	2.800	99,98	0
35	40%	2.105	76%	2.775	2.800	99,96	0

Conforme mencionado no Capítulo 4, cada aumento do estoque deverá ocorrer de forma a manter o mesmo tempo de cobertura para todos os produtos. A Tabela 5.5 apresenta o estoque para cada um dos produtos na situação em que o estoque total é de 1600 peças, que pode ser verificado nos cenários 1 a 7. A situação em que o estoque é ligeiramente maior do que esta é verificada nos cenários 9 a 14 e 21, cujo total é de 2000 peças. O estoque de cada um dos produtos para este segundo caso é mostrado na Tabela 5.6. Pode ser observado que o sistema foi capaz de fornecer o nível de serviço desejado sem uso das faixas amarela e vermelha nos cenários em que não havia variação de demanda (nesse caso, o estoque total foi de 1600 peças), e que em nenhum dos cenários foi necessário utilizar a faixa vermelha (estoque

superior a 3200 peças), mesmo quando a variação de demanda atingiu o nível de 40%. A possibilidade de se realizarem horas extras teve a função de prover um *buffer* de capacidade ao sistema, utilizado nas situações em que foram necessárias mais horas produtivas para a reposição dos estoques. A eliminação de outras fontes de variação no sistema considerado (quebra de máquina, falta de matéria-prima, etc) também colaborou para que a faixa vermelha não tenha sido necessária em nenhum dos casos.

Tabela 5.5 - Estoque de cada produto nas situações em que o estoque total é de 1600 peças.

Produto	Demanda diária média (em peças)	Faixa verde (em peças)	Faixa amarela (em peças)	Faixa vermelha (em peças)	Estoque total (em peças)	Tempo de cobertura do estoque (em dias)
A	240	240	0	0	240	1
B	240	240	0	0	240	1
C	240	240	0	0	240	1
D	160	160	0	0	160	1
E	160	160	0	0	160	1
F	160	160	0	0	160	1
G	160	160	0	0	160	1
H	80	80	0	0	80	1
I	80	80	0	0	80	1
J	80	80	0	0	80	1
Total	1600	1600	0	0	1600	1,00

Tabela 5.6 - Estoque de cada produto nas situações em que o estoque total é de 2000 peças.

Produto	Demanda diária média (em peças)	Faixa verde (em peças)	Faixa amarela (em peças)	Faixa vermelha (em peças)	Estoque total (em peças)	Tempo de cobertura do estoque (em dias)
A	240	240	60	0	300	1,25
B	240	240	60	0	300	1,25
C	240	240	60	0	300	1,25
D	160	160	40	0	200	1,25
E	160	160	40	0	200	1,25
F	160	160	40	0	200	1,25
G	160	160	40	0	200	1,25
H	80	80	20	0	100	1,25
I	80	80	20	0	100	1,25
J	80	80	20	0	100	1,25
Total	1600	1600	400	0	2000	1,25

A primeira análise compara o nível de estoque e capacidade, considerando um mesmo nível de variação de demanda. Como pode ser visto na Tabela 5.4, quando não existe variação de demanda (cenários 1 a 7), não existe diferença entre os níveis de estoque dimensionado e nível de estoque real em nenhum caso. Entretanto, quando a variação de demanda é de 10% (cenários 8 a 14), certa diferença pode ser observada. A Figura 5.1 mostra o resultado. São apresentadas duas curvas, uma delas mostrando o estoque máximo dimensionado (que é o valor do estoque quando não houver cartões no quadro) e o estoque médio real medido ao final de cada dia. Somente quando a capacidade da estação de trabalho for de 1600 peças por dia, o estoque dimensionado deve ser maior do que 2000 peças, considerando a soma de todos os produtos. Além disso, pode-se observar que para os cenários onde existe maior capacidade de produção, os valores do estoque máximo dimensionado e o estoque real se aproximam, o que significa que todos os cartões foram retirados do quadro devido a reposição total dos estoques ter sido realizada em praticamente todos os dias.

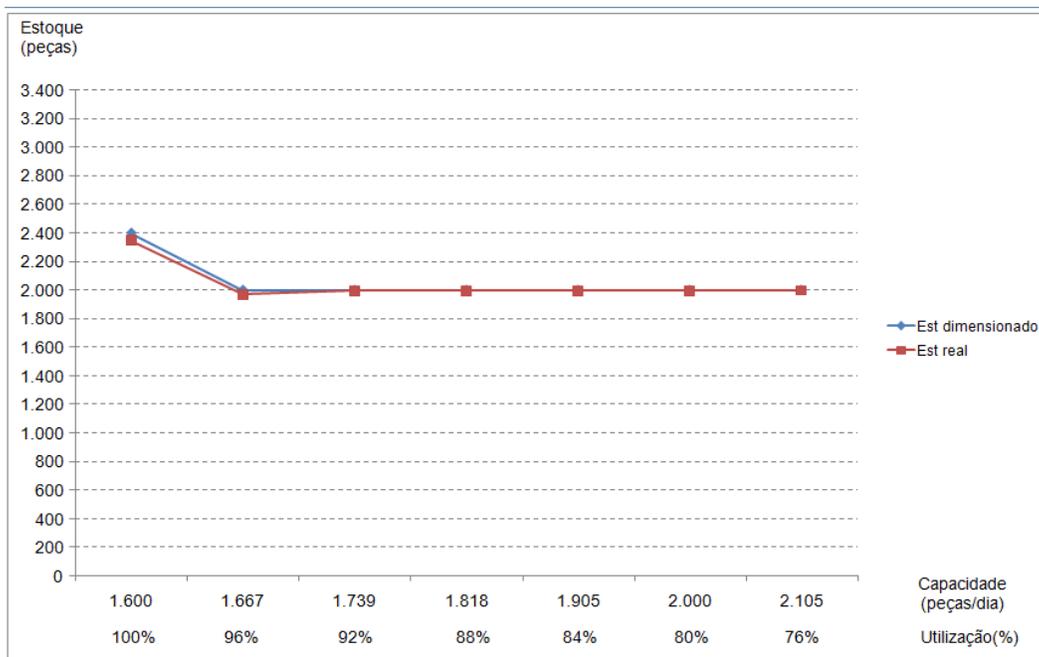


Figura 5.1 - Gráfico do nível de estoque x capacidade de produção considerando variação de demanda de 10%.

A Figura 5.2 mostra os resultados para os cenários 15 a 21, considerando variação de demanda de 20%. A medida em que o nível de capacidade aumenta, os níveis de estoques podem ser reduzidos, assumindo 3 níveis diferentes. De forma semelhante a mostrada na Figura 5.1, nos cenários em que os níveis de capacidade são mais elevados, os estoques reais verificados permanecem iguais aos estoques máximos dimensionados. Nesses casos, a estação de trabalho possui capacidade suficiente para eliminar todos os cartões dos quadros e manter todos os estoques completos.

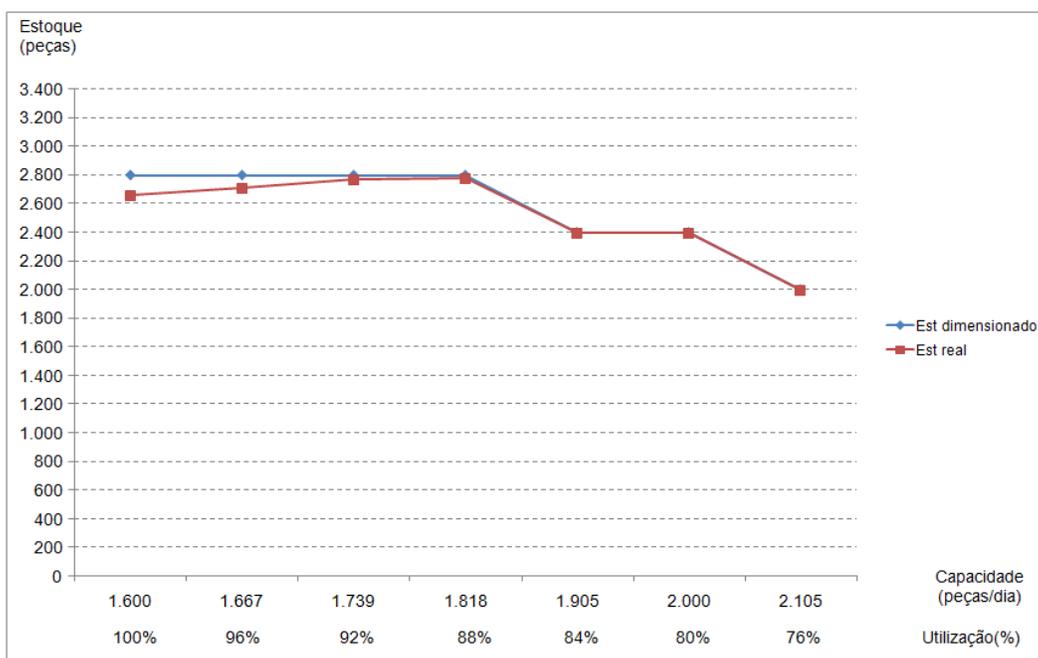


Figura 5.2 - Gráfico do nível de estoque x capacidade de produção considerando variação de demanda de 20%.

Comportamento semelhante é mostrado nas Figuras 5.3 e 5.4, onde os resultados dos cenários 22 a 28 (variação de demanda 30%) e cenários 29 a 35 (variação de demanda 40%), respectivamente, são mostrados. Da mesma forma, verifica-se que o aumento da capacidade permite redução dos estoques dimensionados. A diferença entre o estoque máximo dimensionado e os estoques reais verificados pode ser observada mais facilmente a medida que a variação de demanda aumenta, mesmo para os cenários de capacidade de produção mais elevada.

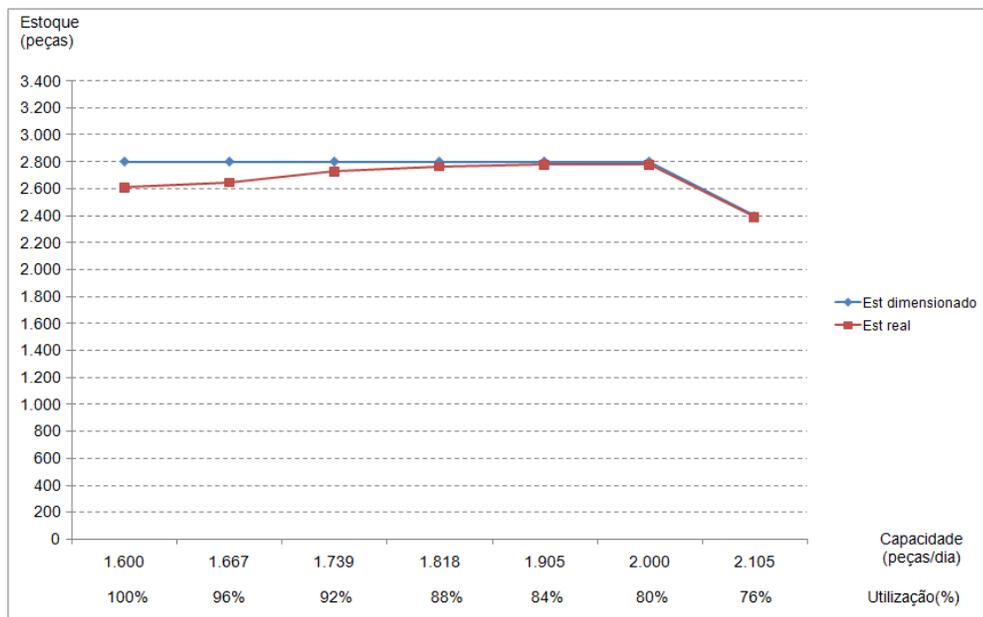


Figura 5.3 - Gráfico do nível de estoque x capacidade de produção considerando variação de demanda de 30%.

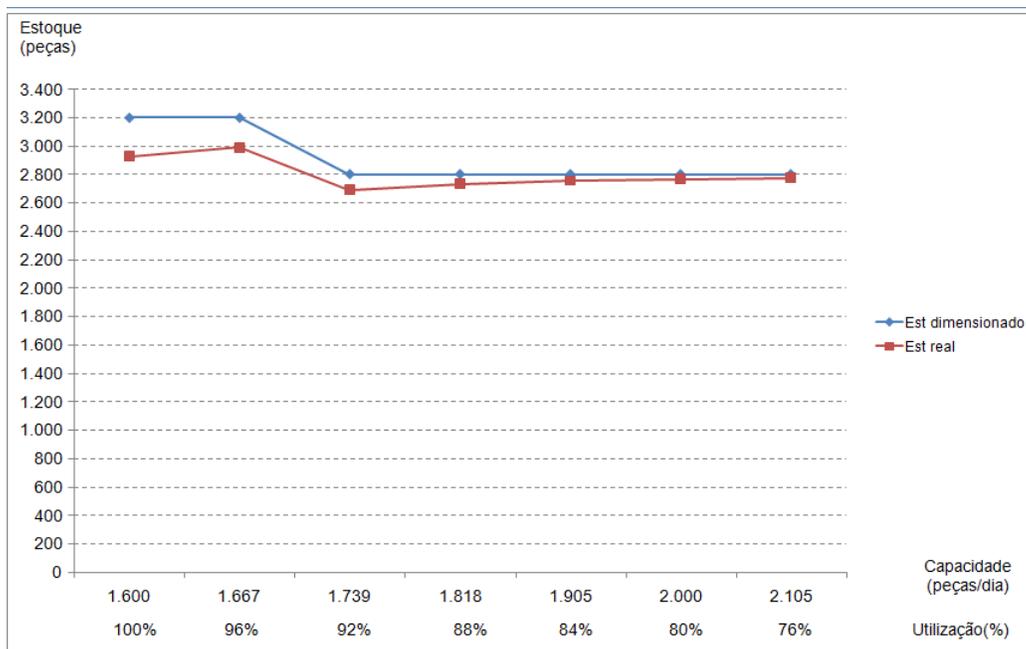


Figura 5.4 - Gráfico do nível de estoque x capacidade de produção considerando variação de demanda de 40%.

O comportamento descrito também pode ser observado através da razão entre o nível de estoque real verificado e o nível de estoque máximo dimensionado. Essa razão quantifica o preenchimento dos estoques em relação ao seu máximo. A Figura 5.5 compara os resultados desta análise para cada nível de variação de demanda. Observa-se assim que a possibilidade da estação de trabalho repor os estoques completamente diminui a medida que a variação de demanda aumenta. Obviamente, se mais capacidade de produção está disponível, maior o preenchimento do estoque em relação ao seu máximo.

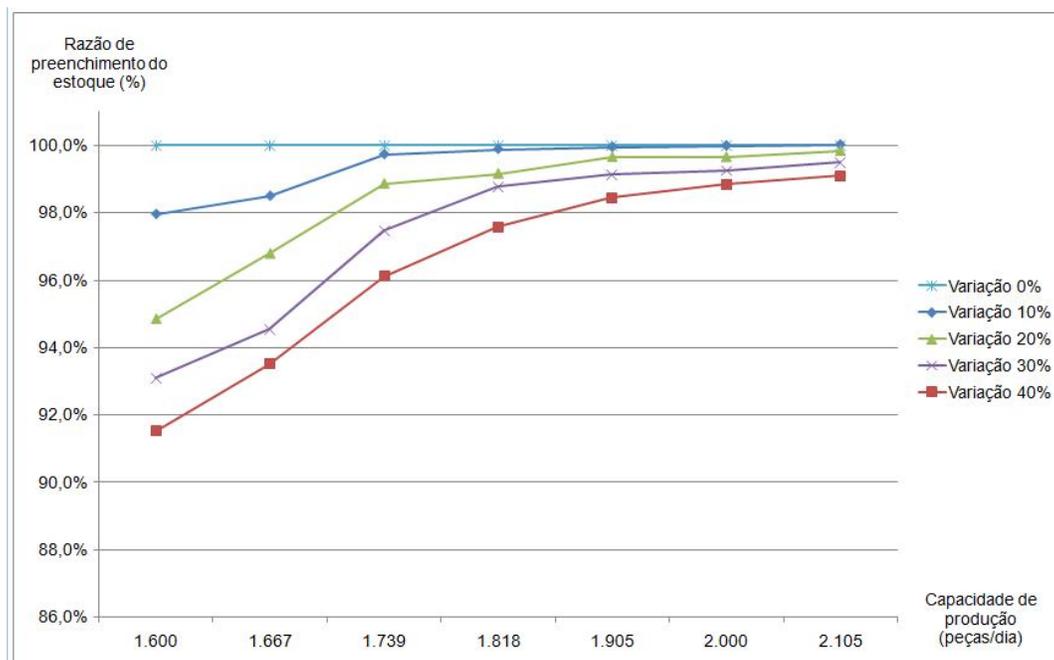


Figura 5.5 - Preenchimento dos estoques considerando diferentes níveis de variação de demanda.

Uma análise considerando os resultados para todos os níveis de variação de demanda apresentados até esse momento, mostra que nem sempre um pequeno aumento de capacidade de produção permite uma redução imediata nos níveis dos estoques. Tal fato pode ser explicado uma vez que os estoques dimensionados não podem assumir qualquer valor, mas devem variar de forma a manter o mesmo nível de cobertura para todos os produtos, conforme critério mostrado nas Tabelas 5.5 e 5.6. Dessa forma, em alguns casos, o aumento de capacidade necessário para permitir a redução dos estoques é bastante significativo. Se os estoques

dimensionados pudessem sofrer pequenas variações, o *trade-off* entre capacidade e estoques seria ainda mais evidente.

Além disso, os resultados das simulações podem ser analisados quando um mesmo nível de capacidade é mantido, alterando a variação de demanda de cada cenário. A Figura 5.6 mostra o resultado dos cenários 1, 8, 15, 22 e 29, todos eles com capacidade de produção de 1600 peças por dia (utilização 100%). Verifica-se que a medida que a variação de demanda é aumentada, maiores níveis de estoque são necessários para garantir o atendimento e acomodar as variações, uma vez que a capacidade de produção é a mesma em todos os casos. O gráfico da Figura 5.6 mostra duas curvas, uma delas para o estoque máximo dimensionado, e outra para o estoque real verificado. Da mesma forma que as figuras anteriores, pode-se observar que a diferença entre o estoque real e o máximo dimensionado aumenta quando o sistema está sujeito a maiores níveis de variação.

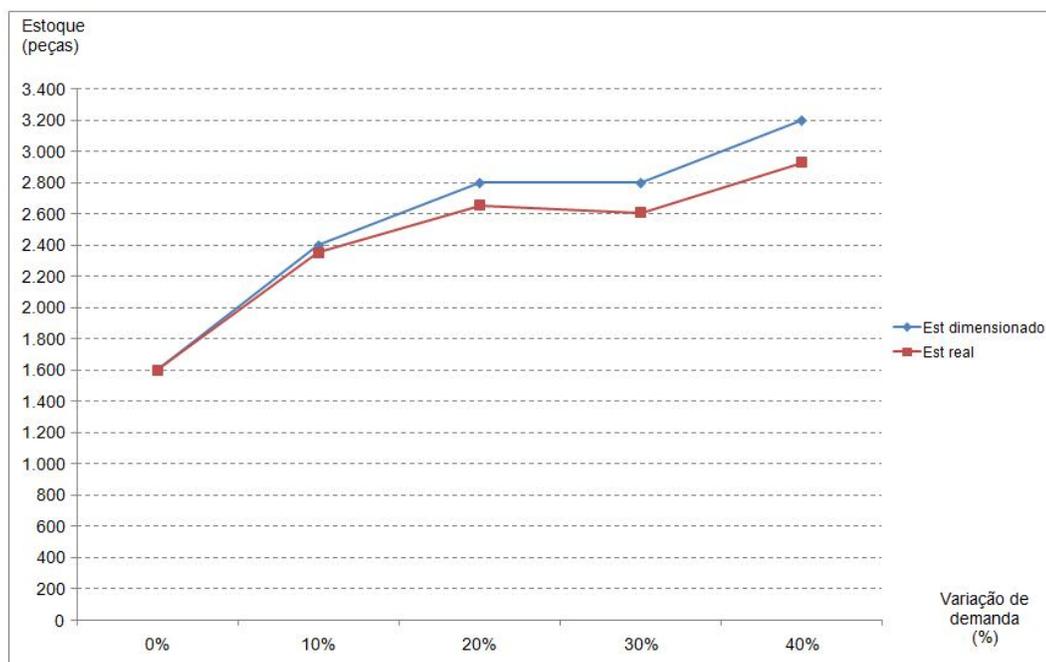


Figura 5.6 - Gráfico do estoque x variação de demanda, considerando a capacidade de produção de 1600 peças por dia (utilização 100%).

O mesmo comportamento pode ser visualizado para outros níveis de capacidade de produção. As Figuras 5.7, 5.8, 5.9, 5.10, 5.11 e 5.12 mostram os resultados para os demais níveis de capacidade.

De forma semelhante às análises mostradas anteriormente, o aumento da capacidade permite ao sistema operar com níveis de estoques menores, obtendo ainda assim o nível de serviço desejado.

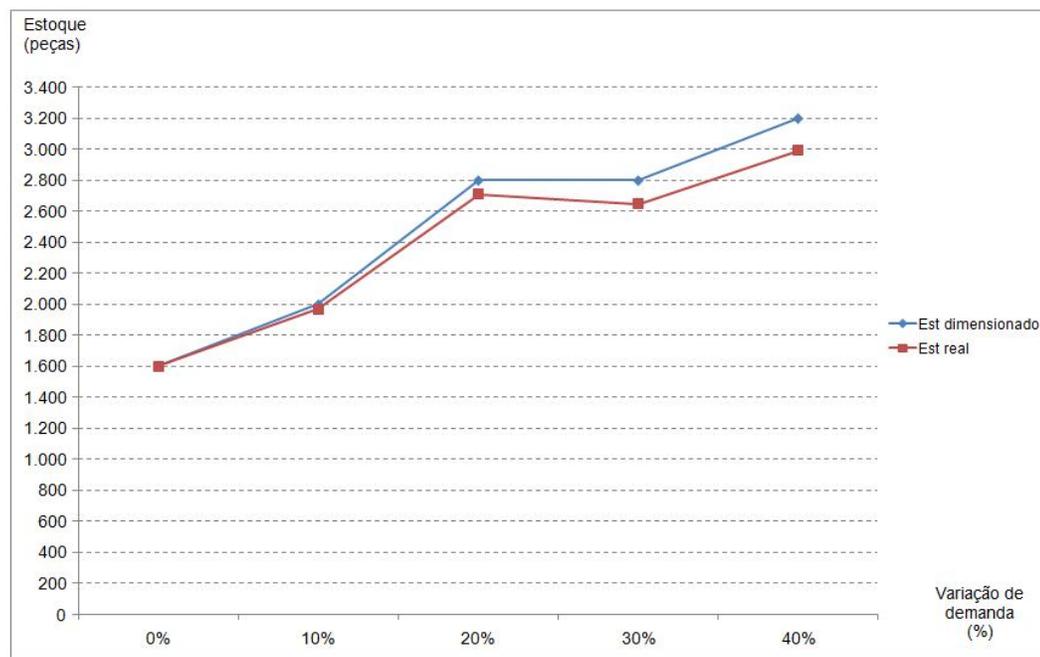


Figura 5.7 - Gráfico do estoque x variação de demanda, considerando a capacidade de produção de 1667 peças por dia (utilização 96%).

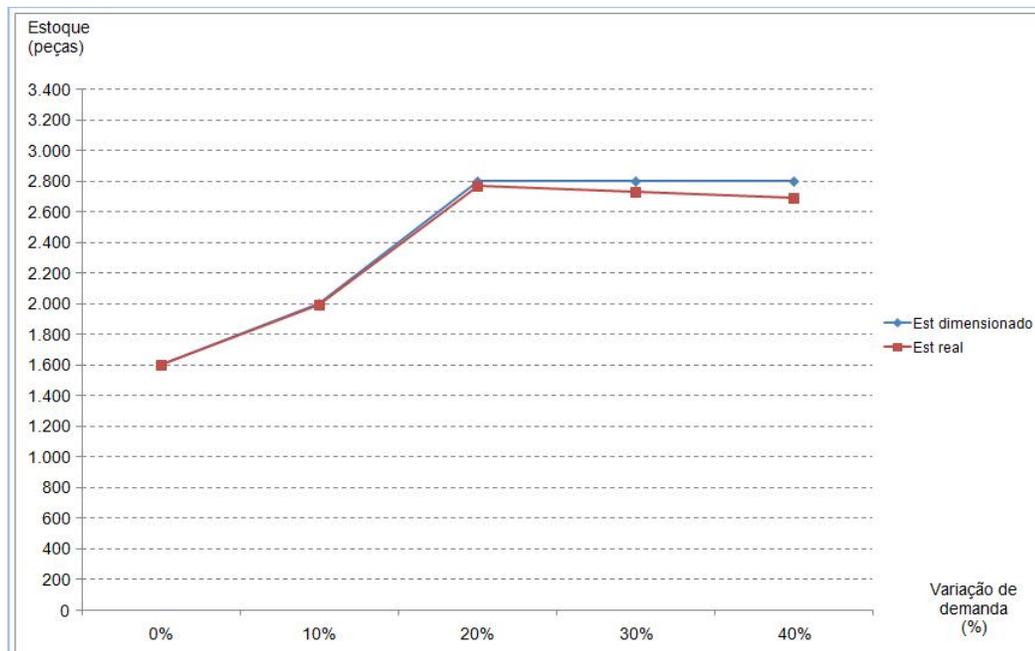


Figura 5.8 - Gráfico do estoque x variação de demanda, considerando a capacidade de produção de 1739 peças por dia (utilização 92%).

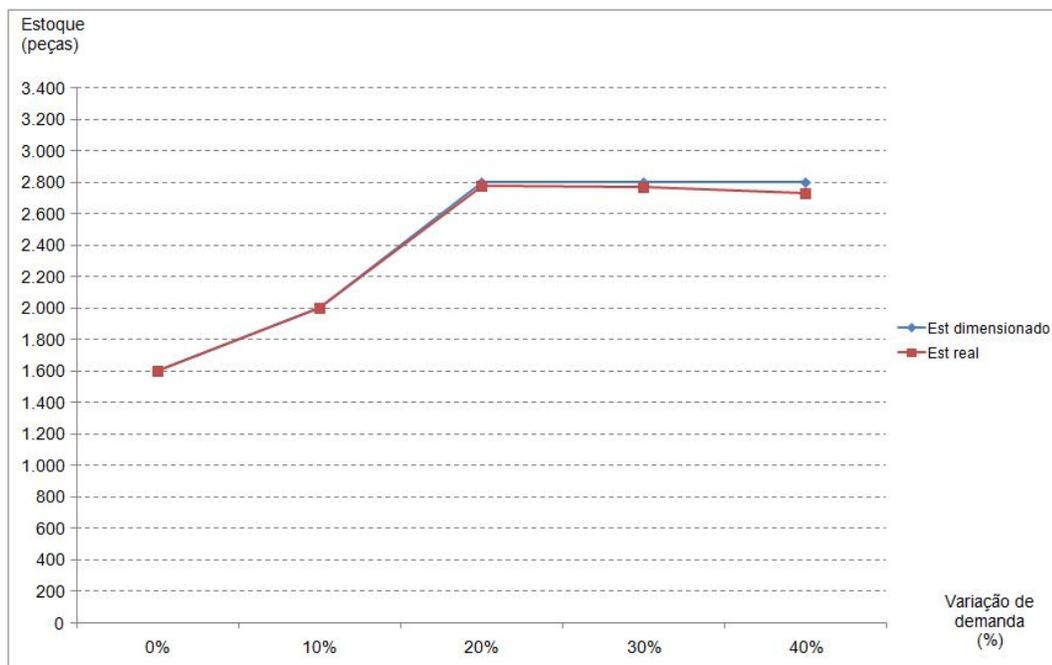


Figura 5.9 - Gráfico do estoque x variação de demanda, considerando a capacidade de produção de 1818 peças por dia (utilização 88%).

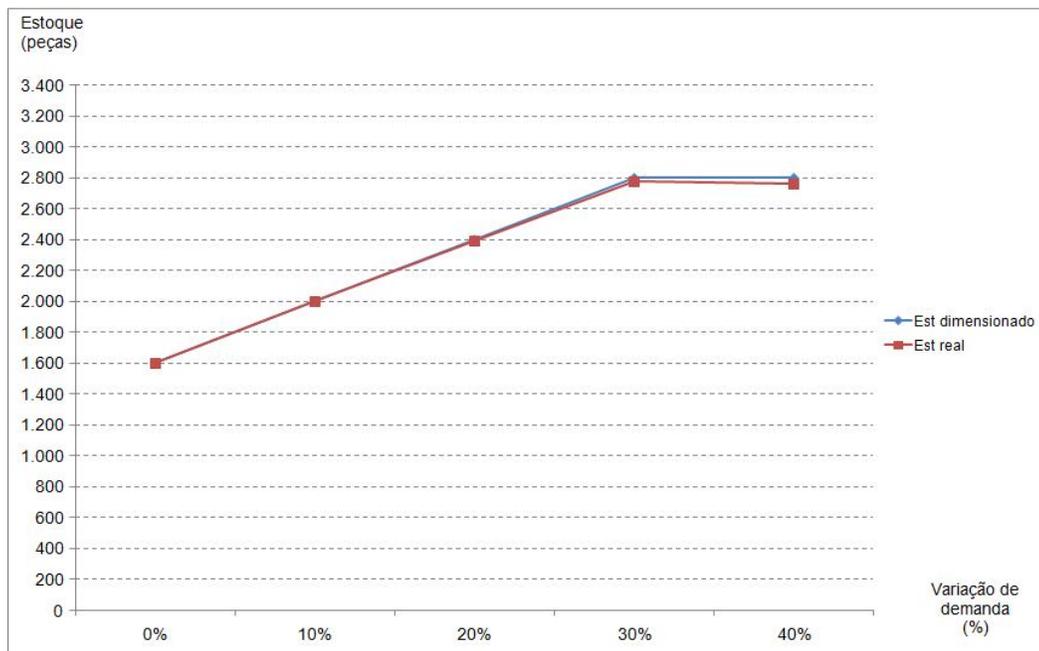


Figura 5.10 - Gráfico do estoque x variação de demanda, considerando a capacidade de produção de 1905 peças por dia (utilização 84%).

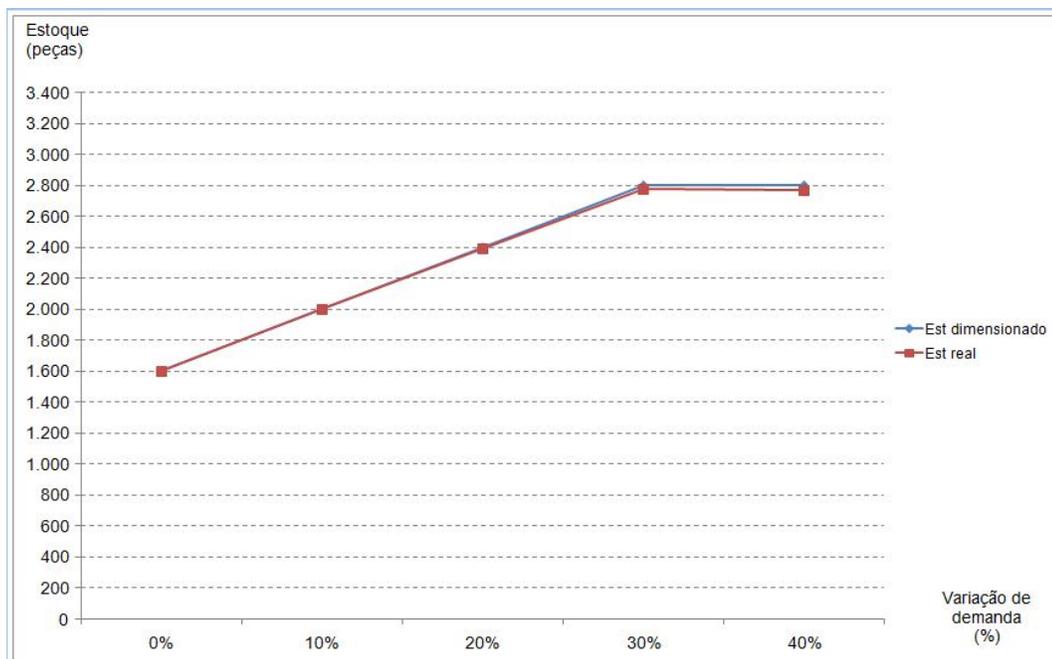


Figura 5.11 - Gráfico do estoque x variação de demanda, considerando a capacidade de produção de 2000 peças por dia (utilização 80%).

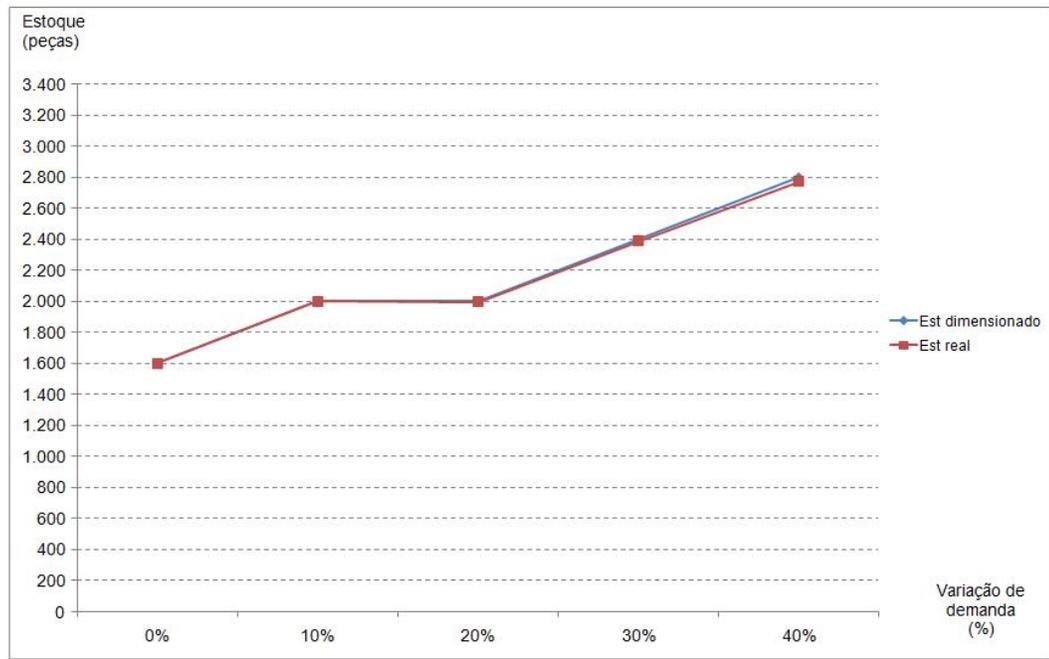


Figura 5.12 - Gráfico do estoque x variação de demanda, considerando a capacidade de produção de 2105 peças por dia (utilização 76%).

Também pode-se analisar o preenchimento dos estoques em cada cenário, conforme mostrado anteriormente, porém em função da variação de demanda. Os resultados são mostrados na Figura 5.13. Cada uma das curvas corresponde a um nível de capacidade de produção. A Figura 5.13 confirma as observações mostradas anteriormente, de forma que os níveis de capacidade maiores permitem um maior preenchimento dos estoques quando comparados a cenários com menor nível de capacidade. O aumento da variação de demanda reduz o preenchimento dos estoques em todos os níveis de capacidade existentes.

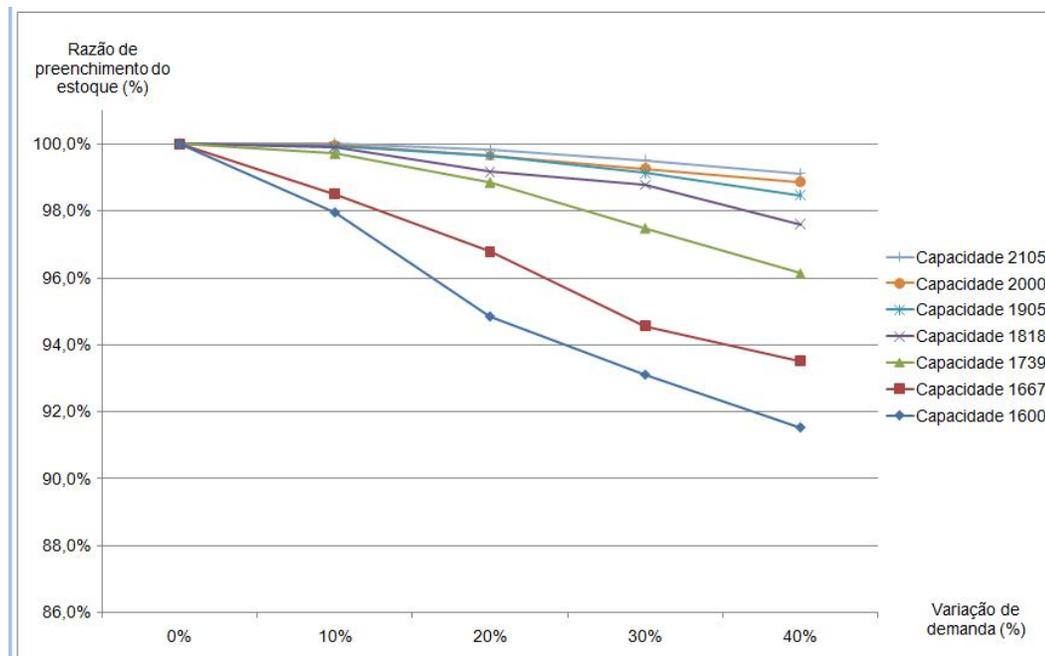


Figura 5.13 - Gráfico do preenchimento dos estoques x variação de demanda para todos os níveis de capacidade de produção.

Uma análise adicional é necessária considerando os resultados operacionais das simulações. Quando o modelo é executado em cenários de maior capacidade de produção, horas extras nunca são realizadas para os níveis de variação de demanda considerados. A quantidade de horas extras realizadas somente é significativa quando o nível de capacidade de produção é de 1600 peças por dia. Os resultados são mostrados na Figura 5.14. Quando não existe variação de demanda, em aproximadamente metade dos dias são realizadas horas extras, devido exclusivamente a variação dos tempos de processo e setup da estação de trabalho. A medida que a variação de demanda é aumentada, observa-se uma redução no número dos dias em que são realizadas horas extras. Não é possível realizar essa análise alterando somente o nível de variação de demanda, uma vez que os estoques precisam ser aumentados para garantir o nível de serviço mínimo. Não existe contradição nos resultados, uma vez que o aumento dos estoques permite ao sistema não ter que trabalhar em horas extras com frequência tão elevada quanto no cenário 1, quando os estoques.

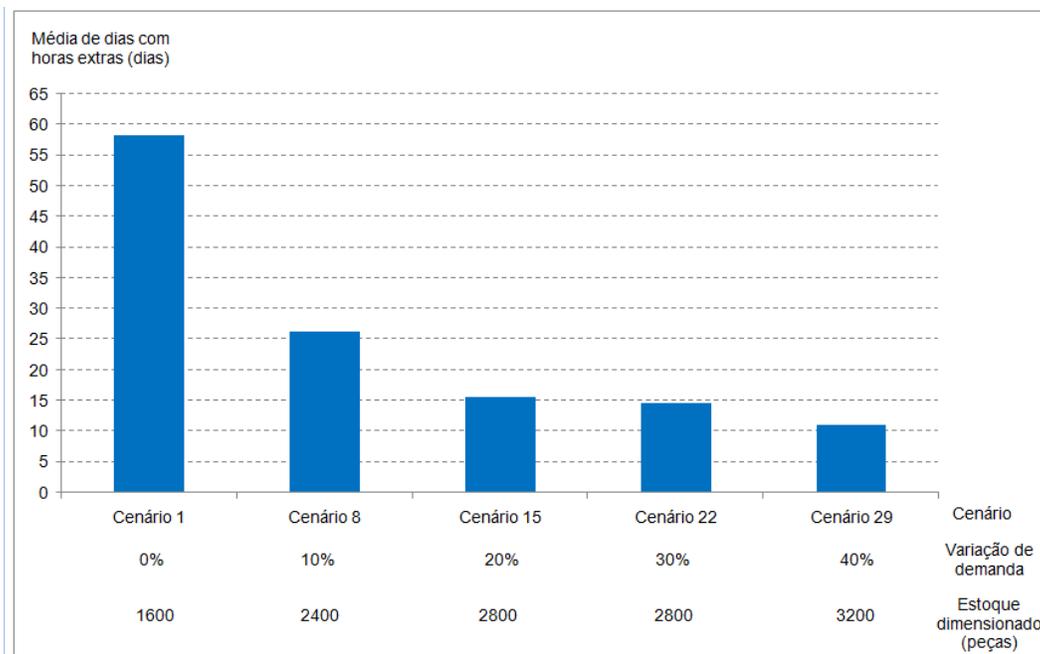


Figura 5.14 - Gráfico da média de dias com horas extras x variação de demanda, considerando capacidade de produção de 1600 peças (utilização 100%).

5.3 ANÁLISE DOS CUSTOS

Após a apresentação dos resultados operacionais, é possível iniciar a análise dos custos envolvidos em cada um dos cenários. A Tabela 5.7 mostra os custos de produção fixos, o custo de produção em horas extras, o custo de estoque e o custo total para cada um dos cenários simulados. Os custos de produção por hora para cada um dos níveis de capacidade foram apresentados na Tabela 5.2, e o custo de estoque considerado inicialmente será de \$0,1 / peça / dia. Com o objetivo de analisar a sensibilidade da relação entre o custo de produção e o custo de estoque, outros valores de custo de estoque serão considerados posteriormente.

Tabela 5.7 - Custos totais e por componentes para cada um dos cenários simulados.

Cenário	Variação de demanda (%)	Capacidade de produção (pçs/dia)	Utilização da capacidade (%)	Estoque médio (pçs)	Estoque max dimensionado	Custo estoque	Custo produção fixo (turno normal)	Custo produção - hora extra	Custo total
1	0%	1.600	100%	1.600	1.600	19.200	192.000	31.428	242.628
2	0%	1.667	96%	1.600	1.600	19.200	200.000	338	219.538
3	0%	1.739	92%	1.600	1.600	19.200	208.696	0	227.896
4	0%	1.818	88%	1.600	1.600	19.200	218.182	0	237.382
5	0%	1.905	84%	1.600	1.600	19.200	228.571	0	247.771
6	0%	2.000	80%	1.600	1.600	19.200	240.000	0	259.200
7	0%	2.105	76%	1.600	1.600	19.200	252.632	0	271.832
8	10%	1.600	100%	2.351	2.400	28.212	192.000	14.148	234.360
9	10%	1.667	96%	1.970	2.000	23.639	200.000	113	223.752
10	10%	1.739	92%	1.994	2.000	23.934	208.696	0	232.629
11	10%	1.818	88%	1.998	2.000	23.970	218.182	0	242.152
12	10%	1.905	84%	1.999	2.000	23.985	228.571	0	252.556
13	10%	2.000	80%	2.000	2.000	23.994	240.000	0	263.994
14	10%	2.105	76%	2.000	2.000	23.999	252.632	0	276.630
15	20%	1.600	100%	2.656	2.800	31.867	192.000	8.424	232.291
16	20%	1.667	96%	2.710	2.800	32.518	200.000	0	232.518
17	20%	1.739	92%	2.768	2.800	33.215	208.696	0	241.910
18	20%	1.818	88%	2.776	2.800	33.317	218.182	0	251.499
19	20%	1.905	84%	2.392	2.400	28.699	228.571	0	257.270
20	20%	2.000	80%	2.392	2.400	28.698	240.000	0	268.698
21	20%	2.105	76%	1.997	2.000	23.960	252.632	0	276.591
22	30%	1.600	100%	2.607	2.800	31.282	192.000	7.884	231.166
23	30%	1.667	96%	2.647	2.800	31.766	200.000	0	231.766
24	30%	1.739	92%	2.729	2.800	32.753	208.696	0	241.448
25	30%	1.818	88%	2.766	2.800	33.189	218.182	0	251.371
26	30%	1.905	84%	2.776	2.800	33.307	228.571	0	261.878
27	30%	2.000	80%	2.779	2.800	33.352	240.000	0	273.352
28	30%	2.105	76%	2.388	2.400	28.655	252.632	0	281.287
29	40%	1.600	100%	2.929	3.200	35.143	192.000	5.940	233.083
30	40%	1.667	96%	2.992	3.200	35.904	200.000	338	236.242
31	40%	1.739	92%	2.691	2.800	32.296	208.696	0	240.992
32	40%	1.818	88%	2.732	2.800	32.790	218.182	0	250.971
33	40%	1.905	84%	2.757	2.800	33.079	228.571	0	261.651
34	40%	2.000	80%	2.768	2.800	33.213	240.000	0	273.213
35	40%	2.105	76%	2.775	2.800	33.298	252.632	0	285.929

Inicialmente, os custos totais de cada cenário devem ser comparados, sendo mostrados na Figura 5.15. Para cada nível de variação de demanda, existe uma curva onde os custos são contabilizados. Como pode ser visto, a medida que a variação de demanda aumenta, maiores os custos envolvidos com o objetivo de acomodar as variações de demanda, o que confirma a hipótese apresentada por Hopp e Spearman (2001). De forma geral cada uma das curvas apresenta-se deslocada verticalmente em relação as demais, ainda que em alguns pontos sejam aproximadamente coincidentes.

Ao se observar cada uma das curvas individualmente, pode-se verificar que existe alguma oscilação nos valores ainda que o comportamento seja predominantemente crescente a medida que a capacidade aumenta, e que para cada uma delas os

pontos que representam os custos mínimos não são verificados sob o mesmo nível de capacidade. A análise dos custos de cada um dos componentes pode explicar melhor o comportamento do custo total para cada nível de variação.

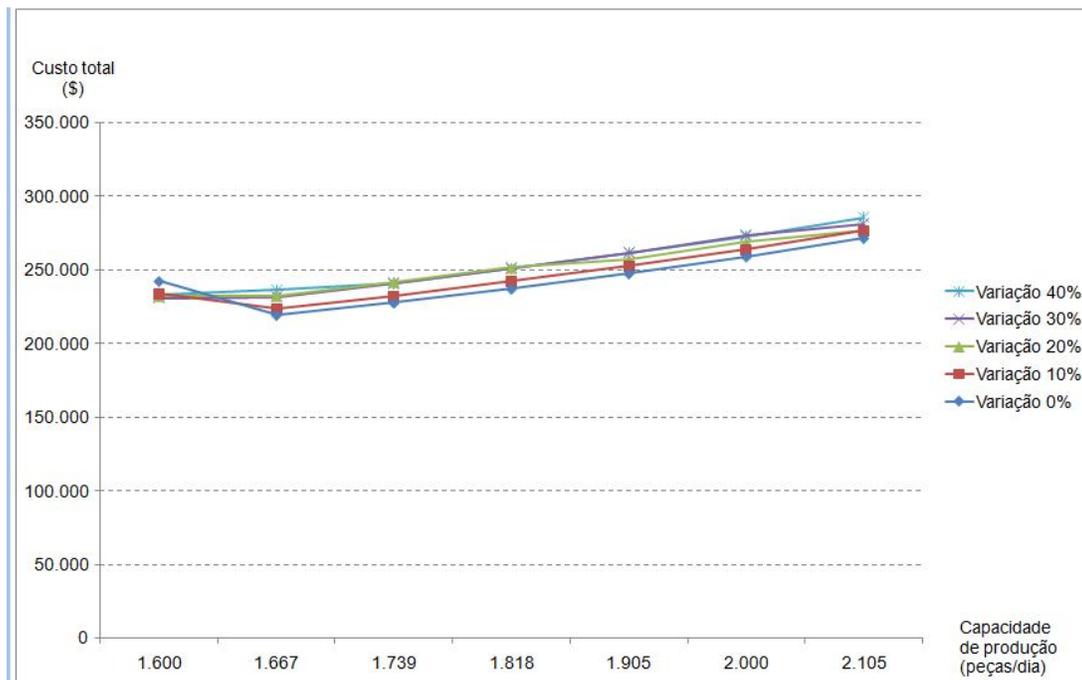


Figura 5.15 - Gráfico dos custos totais para cada um dos cenários simulados.

A Figura 5.16 apresenta os custos para cada um dos componentes quando não existe variação de demanda. O custo total é desdobrado entre o custo de produção fixo, custo de produção em horas extras e o custo de estoque. Como pode ser observado, o custo mínimo é verificado para o cenário cuja capacidade é de 1667 peças / dia. Ainda que o nível de capacidade seja aumentado, não foi possível realizar nenhuma redução nos estoques, já que o estoque máximo dimensionado corresponde a um dia de demanda e o consumo diário é realizado de uma só vez. Dessa forma, diariamente todos os cartões deverão ser eliminados do quadro, o que justifica o elevado custo em horas extras para o menor nível de capacidade. O aumento da capacidade permite eliminar a realização de horas extras e obter uma redução de custo em relação ao cenário de menor capacidade dimensionada.

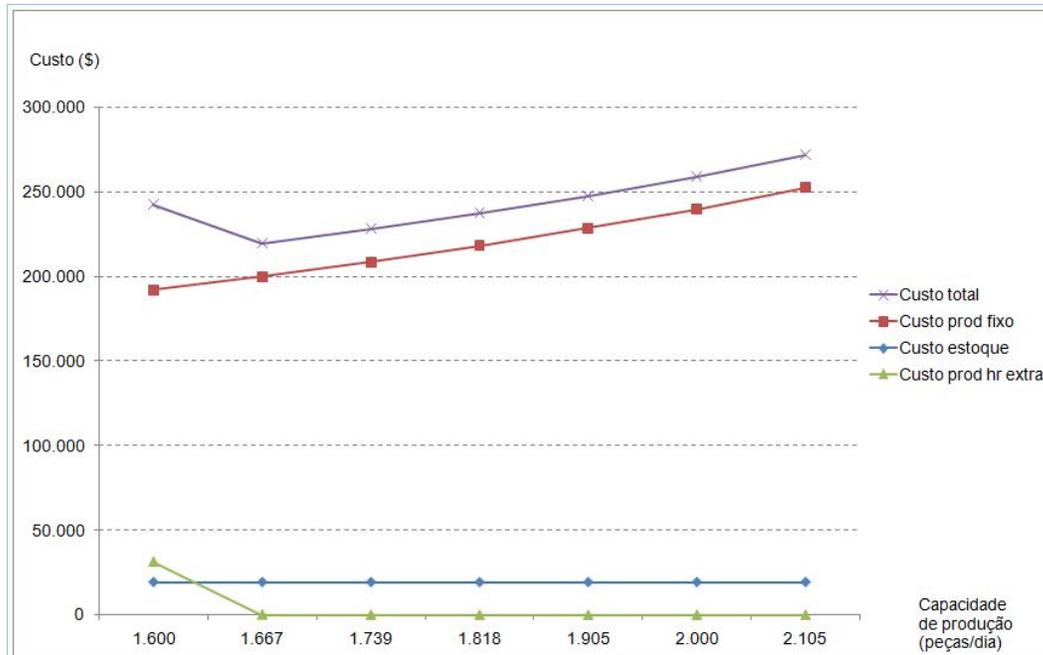


Figura 5.16 - Custo total e custo para cada componente para os cenários em que não existe variação de demanda.

Quando se analisam cenários com variação de demanda de 10%, verifica-se uma situação um pouco distinta. A Figura 5.17 mostra os resultados. Também é possível observar a redução de custo com horas extras logo ao primeiro acréscimo do nível de capacidade. Entretanto, para estes cenários é possível reduzir o nível total de estoques quando o aumento de capacidade ocorre. O custo mínimo é verificado novamente no cenário cuja capacidade é de 1667 peças / dia, ligeiramente maior do que o cenário com a menor nível de capacidade.

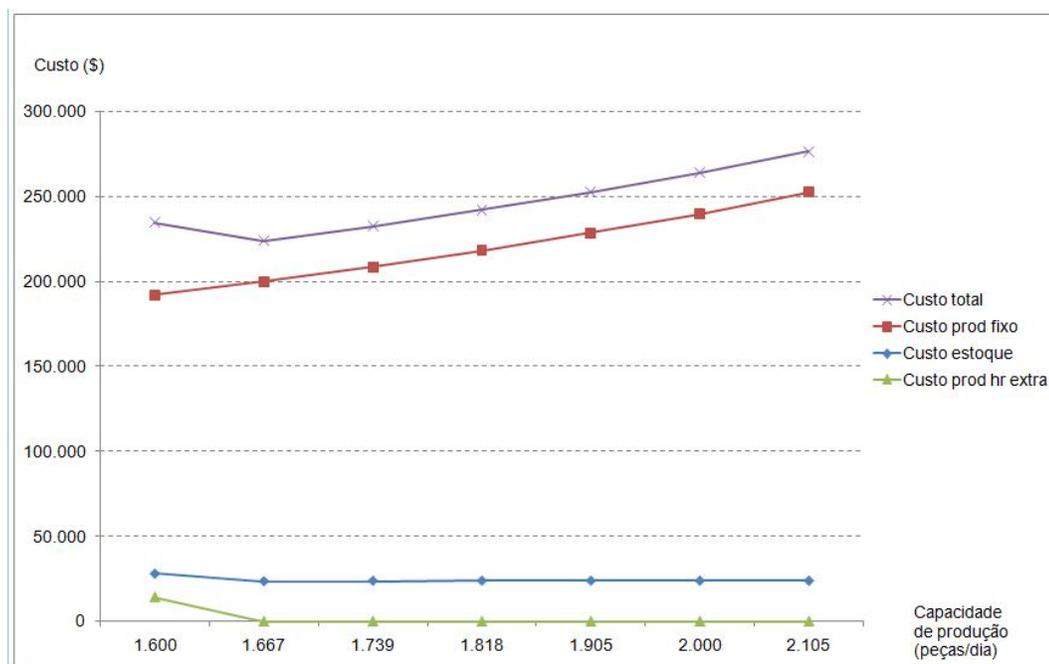


Figura 5.17 - Custo total e custo para cada componente em cenários com variação de demanda de 10%.

A redução do custo dos estoques é ainda mais significativa quando observamos o custo por componente nos cenários com 20% de variação de demanda, mostrado na Figura 5.18. Entretanto, neste caso, muita capacidade de produção deve ser utilizada com este objetivo, fazendo com que o custo de produção fixa seja muito alto. Neste caso, considerando a mesma relação entre custos de produção por hora e custo de manutenção dos estoques, o custo mínimo é verificado no cenário de menor capacidade dimensionada, ou seja, de 1600 peças / dia.

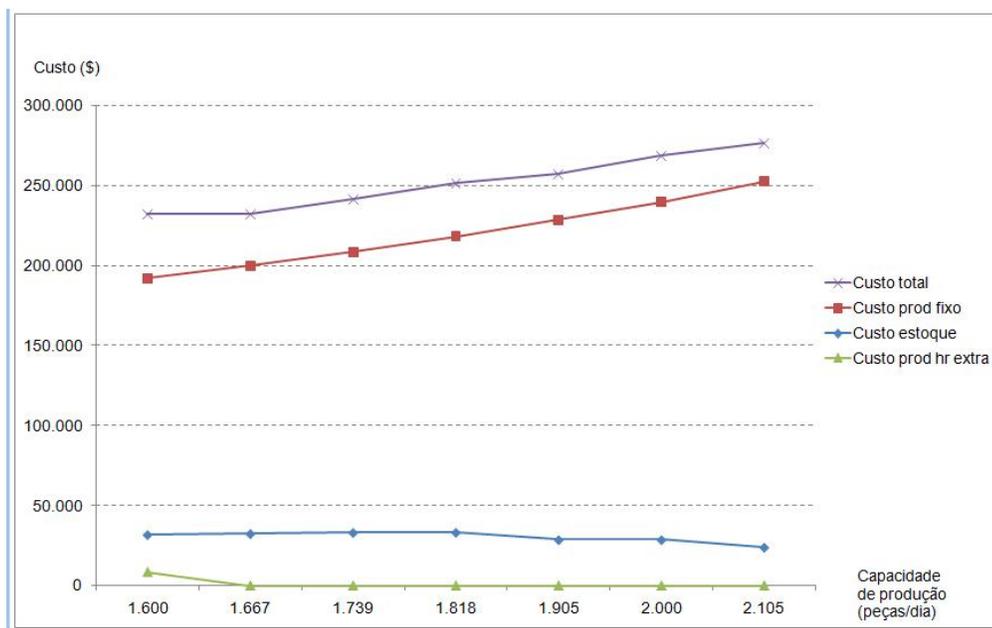


Figura 5.18 - Custo total e custo para cada componente em cenários com variação de demanda de 20%.

Para os cenários com variação de demanda de 30% e 40%, a redução de estoques obtida com o aumento da capacidade é pouca significativa, fazendo com que o custo mínimo seja obtido com o cenário de menor nível de capacidade. As Figuras 5.19 e 5.20 mostram os resultados para estes grupos de cenários. O aumento da capacidade permite a eliminação do custo com horas extras em ambos os casos, o que faz com que o custo total nos cenários de capacidade 1600 peças / dia e 1667 peças / dia sejam praticamente equivalentes.

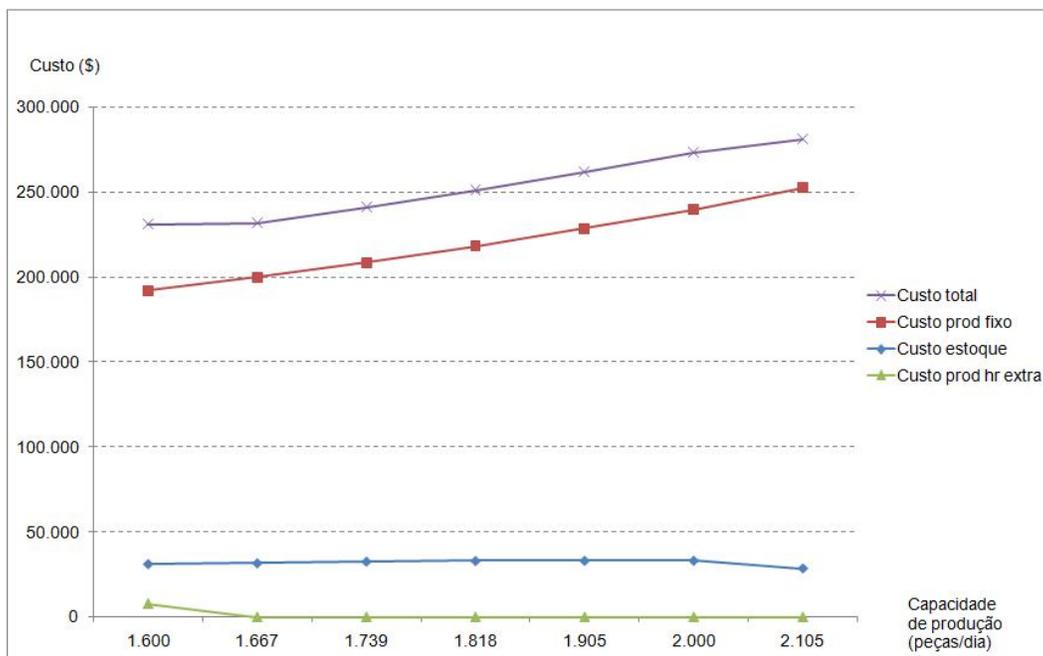


Figura 5.19 - Custo total e custo para cada componente em cenários com variação de demanda de 30%.

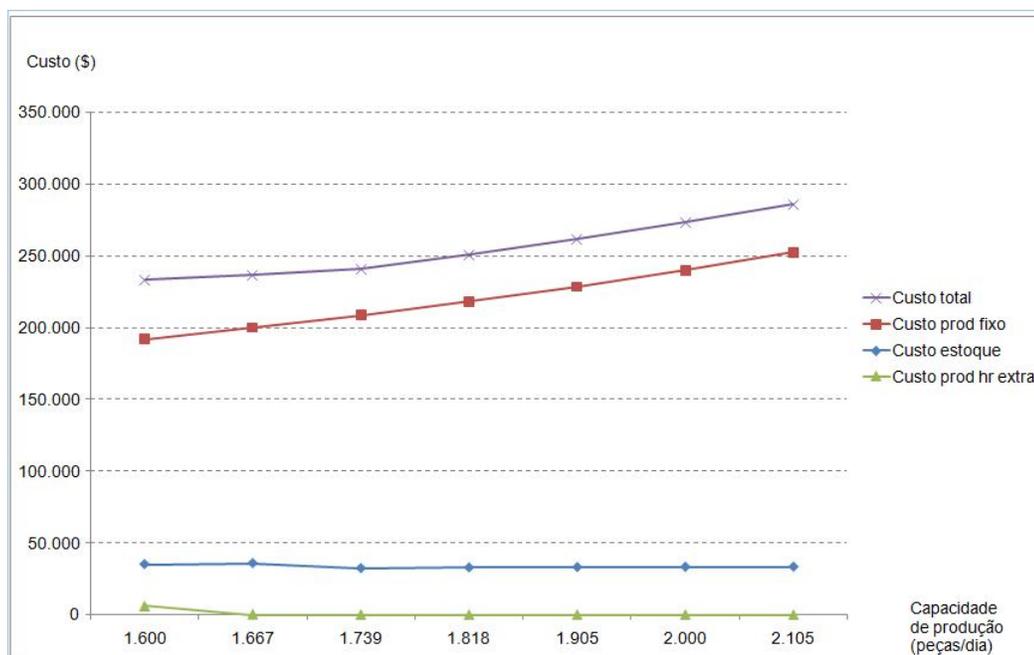


Figura 5.20 - Custo total e custo para cada componente em cenários com variação de demanda de 40%.

Por fim, a medida que a variação de demanda aumenta é possível observar que a participação do custo de estoque no custo total aumenta, uma vez que as capacidades de produção e, portanto custos de produção fixos, são os mesmos, porém os estoques precisam ser aumentados para garantir o nível de serviço desejado. Isso pode ser observado quando se compara as Figuras 5.16 a 5.20, através da distância decrescente entre as curvas de custo de produção fixo e custo dos estoques, ou pela Figura 5.21 que apresenta a participação do custo de estoques no custo total para cada um dos cenários. De forma bastante evidente, quando se observa cada uma das curvas individualmente, pode-se concluir também que a medida que a capacidade é aumentada, a participação do custo dos estoques é reduzida, seja por que o custo de capacidade sofre acréscimo, seja porque o aumento de capacidade permite a diminuição do custo de estoque em termos absolutos.

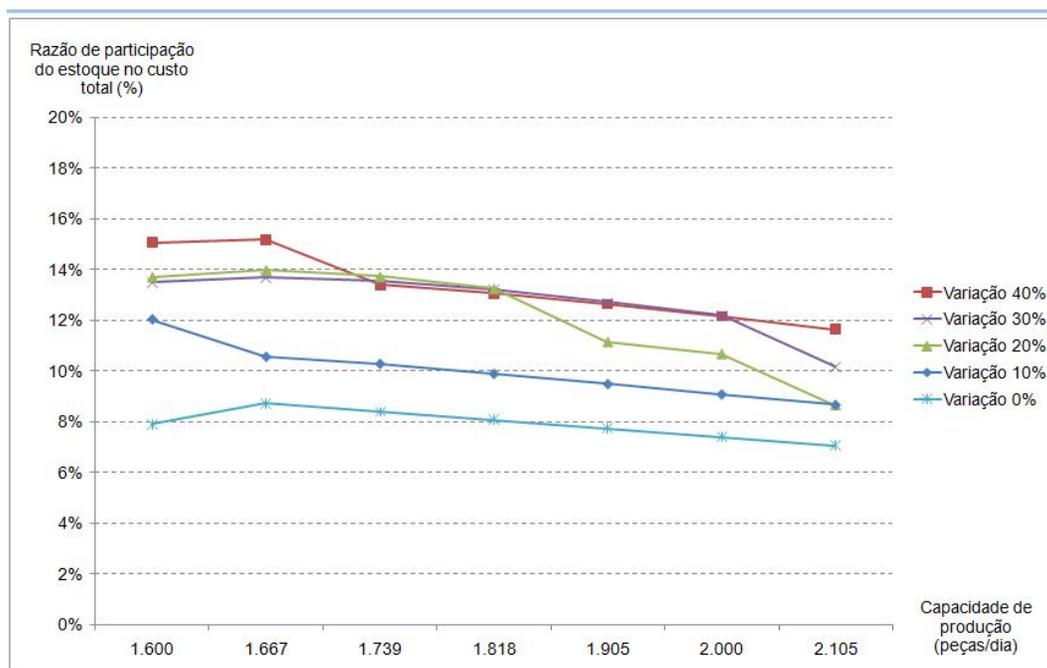


Figura 5.21 - Participação do custo de estoque no custo total da operação para cada um dos cenários para todos os níveis de variação de demanda.

Após a apresentação dos resultados para a situação em que o custo de manutenção dos estoques é de \$0,1 / peça / dia, pode-se analisar brevemente os resultados

quando a relação entre custo de produção e custo de manutenção dos estoques é distinta, visando observar se o comportamento das curvas de custos são semelhantes às apresentadas anteriormente ou não. Os resultados são mostrados na Tabela 5.8.

Tabela 5.8 - Custos totais e por componentes para cada um dos cenários simulados quando o custo de estoque é de \$0,01 / peça / dia.

Cenário	Variação de demanda (%)	Capacidade de produção (pçs/dia)	Utilização da capacidade (%)	Estoque médio (pçs)	Estoque max dimensionado	Custo estoque	Custo produção fixo (turno normal)	Custo produção (H Extra)	Custo total
1	0%	1.600	100%	1.600	1.600	1.920	192.000	31.428	225.348
2	0%	1.667	96%	1.600	1.600	1.920	200.000	338	202.258
3	0%	1.739	92%	1.600	1.600	1.920	208.696	0	210.616
4	0%	1.818	88%	1.600	1.600	1.920	218.182	0	220.102
5	0%	1.905	84%	1.600	1.600	1.920	228.571	0	230.491
6	0%	2.000	80%	1.600	1.600	1.920	240.000	0	241.920
7	0%	2.105	76%	1.600	1.600	1.920	252.632	0	254.552
8	10%	1.600	100%	2.351	2.400	2.821	192.000	14.148	208.969
9	10%	1.667	96%	1.970	2.000	2.364	200.000	113	202.476
10	10%	1.739	92%	1.994	2.000	2.393	208.696	0	211.089
11	10%	1.818	88%	1.998	2.000	2.397	218.182	0	220.579
12	10%	1.905	84%	1.999	2.000	2.398	228.571	0	230.970
13	10%	2.000	80%	2.000	2.000	2.399	240.000	0	242.399
14	10%	2.105	76%	2.000	2.000	2.400	252.632	0	255.031
15	20%	1.600	100%	2.656	2.800	3.187	192.000	8.424	203.611
16	20%	1.667	96%	2.710	2.800	3.252	200.000	0	203.252
17	20%	1.739	92%	2.768	2.800	3.321	208.696	0	212.017
18	20%	1.818	88%	2.776	2.800	3.332	218.182	0	221.513
19	20%	1.905	84%	2.392	2.400	2.870	228.571	0	231.441
20	20%	2.000	80%	2.392	2.400	2.870	240.000	0	242.870
21	20%	2.105	76%	1.997	2.000	2.396	252.632	0	255.028
22	30%	1.600	100%	2.607	2.800	3.128	192.000	7.884	203.012
23	30%	1.667	96%	2.647	2.800	3.177	200.000	0	203.177
24	30%	1.739	92%	2.729	2.800	3.275	208.696	0	211.971
25	30%	1.818	88%	2.766	2.800	3.319	218.182	0	221.501
26	30%	1.905	84%	2.776	2.800	3.331	228.571	0	231.902
27	30%	2.000	80%	2.779	2.800	3.335	240.000	0	243.335
28	30%	2.105	76%	2.388	2.400	2.866	252.632	0	255.497
29	40%	1.600	100%	2.929	3.200	3.514	192.000	5.940	201.454
30	40%	1.667	96%	2.992	3.200	3.590	200.000	338	203.928
31	40%	1.739	92%	2.691	2.800	3.230	208.696	0	211.925
32	40%	1.818	88%	2.732	2.800	3.279	218.182	0	221.461
33	40%	1.905	84%	2.757	2.800	3.308	228.571	0	231.879
34	40%	2.000	80%	2.768	2.800	3.321	240.000	0	243.321
35	40%	2.105	76%	2.775	2.800	3.330	252.632	0	255.961

Quando se consideram os mesmos custos de produção utilizados anteriormente, porém com um custo de manutenção de estoques de \$0,01 / peça / dia, pode observar comportamentos distintos. Essa situação pode representar processos produtivos cujo custo de produção (ou de capacidade) é intensivo, tais quais processos contínuos, siderúrgicos, etc. A Figura 5.22 mostra os resultados. Ao se

analisar os custos totais para cada nível de variação de demanda, verifica-se que um comportamento muito bem definido, evidenciando proporcionalidade nos custos em relação a capacidade de produção utilizada. Ou seja, o componente do custo de estoque tem pouca relevância. A exceção ao comportamento linear é mostrada para os cenários com menor nível de capacidade dimensionada, que estão sujeitos a maiores custos de produção devido a existência de grande número de horas extras. Neste caso, os custos mínimos são obtidos em cenários com os menores níveis de capacidade.

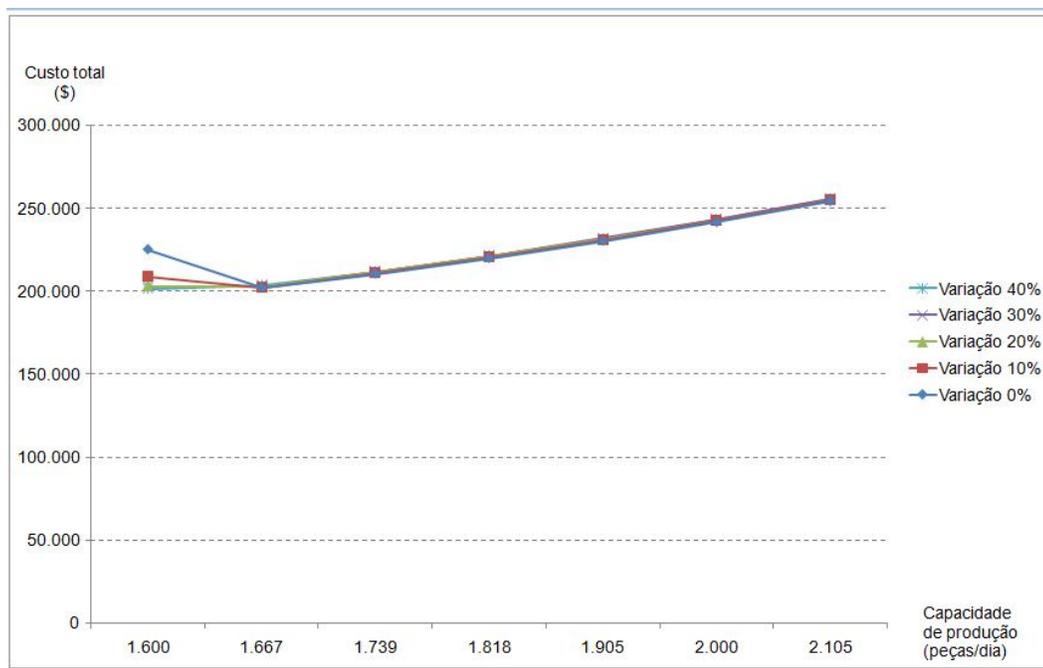


Figura 5.22 - Custos totais para cada um dos cenários considerando custo de manutenção de estoque de \$ 0,01 / peça / dia.

Se a situação fosse oposta, considerando processos em que o custo dos estoques é muito elevado, as conclusões seriam distintas das anteriores. A Tabela 5.9 mostra os resultados considerando os mesmos custos de produção utilizados anteriormente, porém custo de manutenção de estoques de \$1,0 / peça / dia.

Tabela 5.9 - Custos totais e por componentes para cada um dos cenários simulados quando o custo de estoque é de \$1,0 / peça / dia.

Cenário	Variação de demanda (%)	Capacidade de produção (pçs/dia)	Utilização da capacidade (%)	Estoque médio (pçs)	Custo produção fixo (turno normal)	Custo produção (H Extra)	Custo total
1	0%	1.600	100%	1.600	192.000	31.428	415.428
2	0%	1.667	96%	1.600	200.000	338	392.338
3	0%	1.739	92%	1.600	208.696	0	400.696
4	0%	1.818	88%	1.600	218.182	0	410.182
5	0%	1.905	84%	1.600	228.571	0	420.571
6	0%	2.000	80%	1.600	240.000	0	432.000
7	0%	2.105	76%	1.600	252.632	0	444.632
8	10%	1.600	100%	2.351	192.000	14.148	488.268
9	10%	1.667	96%	1.970	200.000	113	436.505
10	10%	1.739	92%	1.994	208.696	0	448.032
11	10%	1.818	88%	1.998	218.182	0	457.882
12	10%	1.905	84%	1.999	228.571	0	468.419
13	10%	2.000	80%	2.000	240.000	0	479.944
14	10%	2.105	76%	2.000	252.632	0	492.620
15	20%	1.600	100%	2.656	192.000	8.424	519.092
16	20%	1.667	96%	2.710	200.000	0	525.184
17	20%	1.739	92%	2.768	208.696	0	540.844
18	20%	1.818	88%	2.776	218.182	0	551.350
19	20%	1.905	84%	2.392	228.571	0	515.559
20	20%	2.000	80%	2.392	240.000	0	526.980
21	20%	2.105	76%	1.997	252.632	0	492.228
22	30%	1.600	100%	2.607	192.000	7.884	512.700
23	30%	1.667	96%	2.647	200.000	0	517.656
24	30%	1.739	92%	2.729	208.696	0	536.224
25	30%	1.818	88%	2.766	218.182	0	550.070
26	30%	1.905	84%	2.776	228.571	0	561.639
27	30%	2.000	80%	2.779	240.000	0	573.516
28	30%	2.105	76%	2.388	252.632	0	539.184
29	40%	1.600	100%	2.929	192.000	5.940	549.372
30	40%	1.667	96%	2.992	200.000	338	559.382
31	40%	1.739	92%	2.691	208.696	0	531.656
32	40%	1.818	88%	2.732	218.182	0	546.078
33	40%	1.905	84%	2.757	228.571	0	559.363
34	40%	2.000	80%	2.768	240.000	0	572.128
35	40%	2.105	76%	2.775	252.632	0	585.608

Os custos totais são mostrados para nível de variação são mostrados na Figura 5.23. Pode-se observar que, para este caso, a relação entre o aumento da capacidade e o aumento dos custos totais é bem menos evidente, diferentemente dos resultados mostrados anteriormente. Para os cenários cuja variação de demanda é de 20%, verifica-se que o custo mínimo é obtido com o maior nível de capacidade dimensionada, de 2105 peças / dia. Com exceção dos cenários com 30% de variação de demanda, o custo total mínimo de cada curva não foi obtido com o menor nível de capacidade.

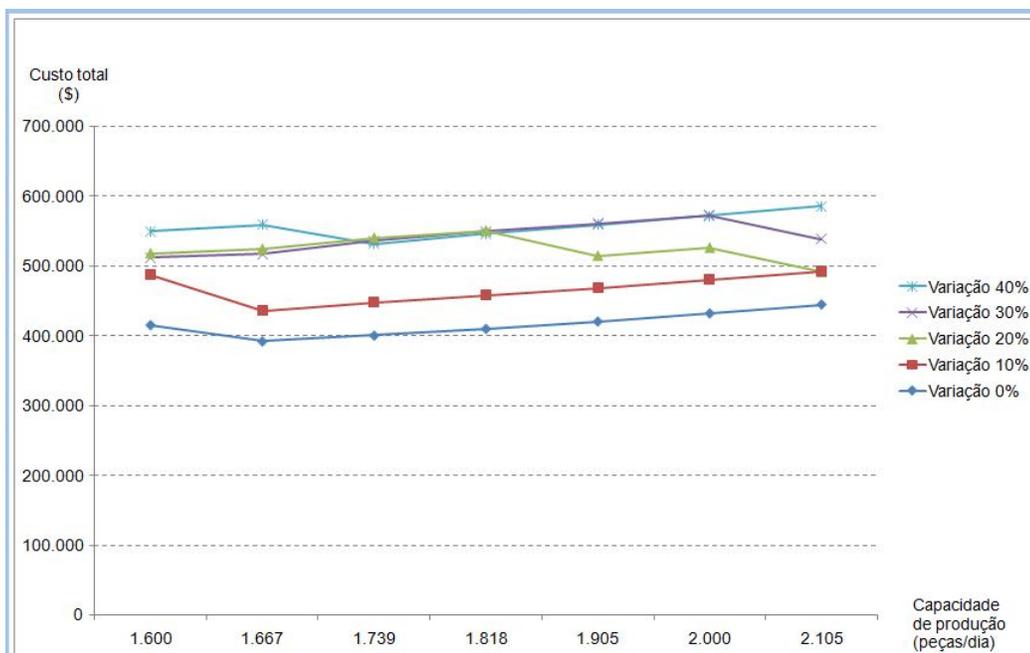


Figura 5.23 - Custos totais para cada um dos cenários considerando custo de manutenção de estoque mais significativo em relação ao custo de produção.

Dessa forma, a hipótese de Garg; Vrat e Kanda é verificada, uma vez que os autores salientam que as conclusões dependem da relação entre custos de produção e de estoques.

Por fim, o *trade-off* representado pelo triângulo de processo mostrado por Klassen e Menor (2007) é verificado, uma vez que a existência de variação de demanda exige mais recursos para obter o nível de serviço desejado, e que a capacidade de produção e o estoque atuam como *buffers* num sistema, sendo substitutos nessa função. Para os casos em que os custos de estoque forem elevados, quando comparados aos custos de produção, o uso da capacidade de produção como *buffer* mostra-se uma alternativa mais econômica em relação ao uso dos estoques com este objetivo.

6. CONCLUSÕES

A revisão bibliográfica realizada discutiu a existência do chamado “triângulo de processos”, descrito por Klassen e Menor (2007), definindo a relação entre os *buffers* de capacidade, o estoque e as variações num sistema. Entende-se *buffer* como um recurso utilizado em excesso ou com algum grau de superdimensionamento, visando amortecer variações num sistema. O impacto negativo no desempenho dos sistemas gerado por variações e o uso de *buffers* de capacidade e estoques, descrito pelos autores, foi avaliado através da definição de um sistema, e implementação e execução de um modelo de simulação, utilizando o software Arena. O sistema considerado é composto por uma estação de trabalho responsável pela produção de um mix de 10 produtos, cujo estoque é controlado por um sistema puxado do tipo Kanban. O uso de um *buffer* de tempo não foi considerado na análise, podendo ser analisado em estudo futuro.

Os resultados obtidos confirmaram as expectativas em relação ao triângulo de processos, verificando o uso substituto de capacidade e estoques como *buffers*, já que estes permitiram acomodar a influência negativa das variações no sistema. A possibilidade de se realizarem horas extras em todos os cenários, além dos diferentes níveis de capacidade definidos, permitiu a redução dos estoques necessários para se obter o nível de serviço desejado.

Uma análise complementar foi realizada, verificando os custos envolvidos em cada um dos cenários simulados. Foi possível concluir que a capacidade mostrou-se um *buffer* economicamente interessante em cenários em que o custo dos estoques é elevado quando comparado ao custo de capacidade. Para situações em que o custo de capacidade representa a maior parte do custo total, ou seja, quando o custo dos estoques é menos significativo, o custo total é menor nas situações em que o nível de capacidade de produção é menor. Uma vez que as conclusões podem variar em função da relação entre o custo de capacidade e o custo de estoque, vale destacar que a maior contribuição deste trabalho é apresentar um método de análise para avaliar se o *buffer* de capacidade é uma alternativa economicamente viável para a acomodação das variações.

A produção e reposição dos estoques foram controladas por um sistema kanban. Trata-se de um sistema capaz de limitar a quantidade de material em processo (sistema puxado). Uma vez que para a maior parte dos cenários simulados a capacidade dimensionada foi maior do que a demanda do cliente, a função de limitar a quantidade de material em processo foi importante, evitando o aumento dos estoques. Assim, os resultados aqui apresentados poderão ser distintos quando se considera sistemas empurrados em que não existe limitação do material em processo. Essa análise constitui uma possibilidade de trabalho futuro. Da mesma forma, outra possibilidade de estudo futuro pode considerar o abastecimento de um cliente interno também controlado por um sistema kanban, ao invés de abastecer um cliente externo conforme realizado, já que assim o perfil de demanda analisado poderá ser distinto. Uma terceira possibilidade de estudo futuro pode contemplar diferentes tamanhos de mix de produtos, analisando se esta característica teria impacto no desempenho do sistema.

Foi verificado também que, de acordo com o modelo teórico analisado, os resultados indicam que o sistema kanban poderia ser utilizado em situações em que a variação de demanda é maior do que 10%, o que contradiz o exposto por Monden (1981), Marek; Elkins e Smith (2001) e Takahashi; Morikawa e Nakamura (2004), mas está acordo com Fernandes e Maccarthy (2000) e Smalley (2004). Essa alternativa pode ser avaliada em sistemas reais. Obviamente, se a variação de demanda for menor, o sistema terá melhor desempenho ou poderá operar com uma menor combinação entre *buffers* de estoque e capacidade.

Por fim, destaca-se outra possibilidade de realização de trabalho futuro, avaliando se outros métodos de dimensionamento de estoques devem considerar a relação entre capacidade e demanda (ou utilização de capacidade) em seus cálculos ou não, uma vez que essa variável mostrou ter impacto nos resultados apresentados, de forma a exigir o aumento ou permitir a redução dos estoques necessários para obter um bom nível de serviço. Apesar dos resultados numéricos obtidos através de várias simulações, este trabalho não definiu uma relação quantitativa direta entre os *buffers* de capacidade e estoque, de forma a permitir projeções sobre o uso de cada um deles numa determinada situação.

REFERÊNCIAS

AKTURK, M. S.; ERHUN, F. An overview of design and operational issues of kanban systems. *International Journal of Production Research*, v.37, n.17, p. 3859-3881, 1999.

BERKLEY, B.J. A review of the kanban production control research literature. *Production and operations management*, v.1, n.4, p. 393-411, 1992.

BERTRAND, J. W. M.; FRANSOO, J. C. Operations management research methodologies using quantitative modeling. *International Journal of Operations & Production Management*, v.22, n.2, p. 241-264, 2002.

CARSON, J. S. Model verification and validation. In: *Proceedings of the 2002 Winter Simulation Conference*, 2002.

DUGGAN, K. **Creating mixed model value streams:** Practical lean techniques for building to demand. New York: Productivity Press, 2002.

FERNANDES, F. C. F.; MACCARTHY, B. L. A multi-dimensional classification of production systems for the design and selection of production planning and control systems. *Production Planning and Control*, v.11, n.5, p. 481-496, 2000.

GARG, S.; VRAT, P.; KANDA, A. Equipment flexibility vs. inventory: a simulation study of manufacturing systems. *International Journal of Production Economics*, n.70, p. 123-145, 2001.

HOPP, W. J.; SPEARMAN, M. L. **Factory Physics:** Foundations of Manufacturing Management. Boston: Irwin/McGraw-Hill, 2001.

_____. To pull or not to pull: What's the question? *Manufacturing & Service Operations Management*, v.6, n.2, p. 133-148, 2004.

HUANG, C.; KUSIAK, A. Overview of Kanban systems. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, v.9, n.3, p. 169-189, 1996.

HURLEY, S. F.; WHYBARK, D. C. Inventory and capacity trade-offs in a manufacturing cell. *International Journal of Production Economics*, v.59, p. 203-212, 1999.

KLASSEN, R.; MENOR, L. The process management triangle: An empirical investigation of process trade-offs. *Journal of Operations Management*, v.25, p. 1015-1034, 2007.

KUMAR, C. S.; PANNEERSELVAM, R. Literature review of JIT-Kanban system. *International Journal of Advanced Technology*, v.32, p. 393-408, 2007.

LANGLEY, G. J.; NOLAN, K. M.; NOLAN, T. W.; NORMAN, C. L.; PROVOST, L. P. *The improvement guide: A practical approach to enhancing organizational performance*. San Francisco: Jossey-Bass, 1996.

LAW, A.; KELTON, D. **Simulation modeling and analysis**. New York: McGraw-Hill, 2000.

LEE, H. L.; PADMANABHAN, V.; WHANG, S. Information distortion in a supply chain: The bullwhip effect. *Management Science*, v.43, n.4, p. 546-558, 1997.

MAPES, J. The effects of capacity limitations on safety stock. *International Journal of Operations and Production Management*, v.13, n.10, p. 26-33, 1993.

MAREK, R.P.; ELKINS, D.A.; SMITH, D.R. Understanding the fundamentals of kanban and conwip pull systems using simulation. In: *Proceedings of the 2001 Winter Simulation Conference*, 2001.

MONDEN, Y. Adaptable Kanban system helps Toyota maintain just-in-time Production. *Industrial Engineering*, v.13, n.5, p. 29-46, 1981.

ROTHER, M.; SHOOK, J. **Aprendendo a enxergar: Mapeando o fluxo de valor para agregar valor e eliminar o desperdício**. São Paulo: Lean Institute Brasil, 1999.

SARGENT, R. G. Validation and verification of simulation models. In: Proceedings of the 2004 Winter Simulation Conference, 2004.

SHANNON, R. E. Introduction to the art and science of simulation. In: Proceedings of the 1998 Winter Simulation Conference, 1998.

SIPPER, D.; BULFIN, R. L. **Production: Planning, Control and Integration**. Singapore: McGraw-Hill, 1997.

SLACK, N.; CHAMBERS, S.; JOHNSTON, R. **Administração da produção**. 2. ed. São Paulo: Editora Atlas, 2002.

SMALLEY, A. **Creating level pull: A lean production-system improvement guide for production-control, operations, and engineering professionals**. Brookline: The Lean Enterprise Institute, 2004.

TAKAHASHI, K.; MORIKAWA, K.; NAKAMURA, N. Reactive JIT ordering system for changes in the mean and variance of demand. *International Journal of Production Economics*, v.92, p. 181-196, 2004.

TARDIN, G. G. **O sistema puxado e o nivelamento da produção**. 2001. 111 p. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2001.

UZSOY, R.; MARTIN-VEGA, L. A. Modeling kanban based and demand-pull systems: A survey and critique. *Manufacturing Review*, v.3, p. 155-160, 1990.

APÊNDICE A – Implementação do modelo software Arena

Será descrita a seguir a implementação do modelo descrito anteriormente, utilizando os módulos disponíveis no software Arena.

1 Geração da demanda, envio e atendimento dos pedidos

A descrição do processo de geração da demanda, envio dos pedidos ao fornecer e atendimento será realizada utilizando como exemplo o produto 'A'. Os demais produtos possuem lógica semelhante.

Primeiramente, utilizou-se um módulo CREATE, necessário para gerar uma entidade no sistema. Diariamente uma nova entidade será gerada, como pode ser visto pela Figura 1, através do tempo entre chegadas constante e igual a 1 dia.

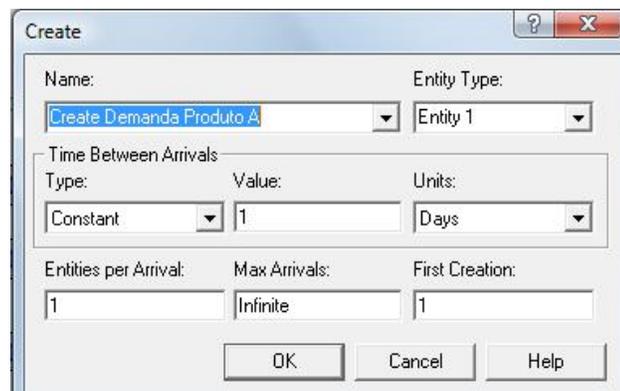


Figura 1 - Lógica utilizada para gerar uma entidade diariamente.

A entidade gerada diariamente é enviada a um módulo ASSIGN, responsável por definir o valor de demanda diária para o produto A, como mostrado na Figura 2.

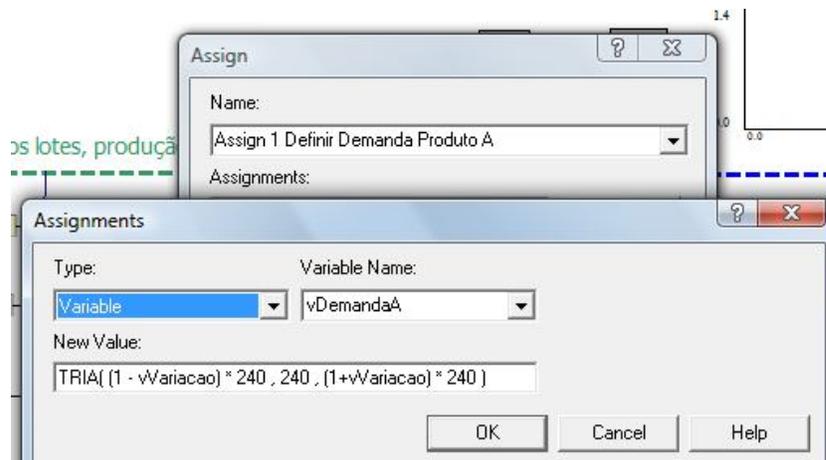


Figura 2 - Módulo ASSIGN utilizado para definir a demanda do produto A.

No caso mostrado na Figura 2, o produto 'A' possui demanda descrita por uma distribuição triangular de moda 240, cujos valores máximo e mínimo dependem de uma variável chamada 'vVariação'. A variável 'vVariação' é um dos parâmetros do experimento, podendo assumir valores de 0 até 0,4 (o que permite uma variação na demanda de 0% a 40% em relação a moda da distribuição, respectivamente). A demanda definida por essa variável aleatória pode assumir qualquer valor dentro do intervalo possível, uma vez que a distribuição triangular é utilizada para variáveis contínuas. Assim, este valor será arredondado posteriormente.

Definida a demanda diária do produto A, deve-se calcular a necessidade líquida do produto no dia, já que pode existir saldo em estoque no cliente, dependendo da demanda e da entrega realizada no dia anterior. Assim, um novo módulo ASSIGN define a variável 'vPedidoA', o que corresponde a necessidade líquida do produto A, como pode ser visto na Figura 3.

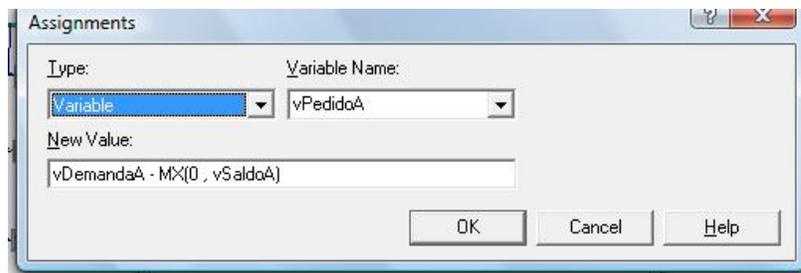


Figura 3 - Módulo ASSIGN responsável por definir a necessidade líquida do produto A.

Para definir o valor da variável 'vPedidoA' é subtraído da demanda do produto o maior valor entre zero e o saldo em estoque existente no cliente (definido pela variável 'vSaldoA'), de forma que pedidos não atendidos nos dias anteriores não serão considerados.

Após a definição da necessidade líquida do produto 'A', um novo módulo ASSIGN realiza dois cálculos. O primeiro deles, como pode ser visto na Figura 4, é responsável por converter a necessidade líquida do produto no dia em número de *containers* que serão pedidos (variável 'vLotesA'). Isso é realizado através da expressão 'vPedidoA / 20'. Utiliza-se ainda um artifício para garantir que o arredondamento realizado seja sempre para cima, o que justifica a constante somada ao resultado da expressão.

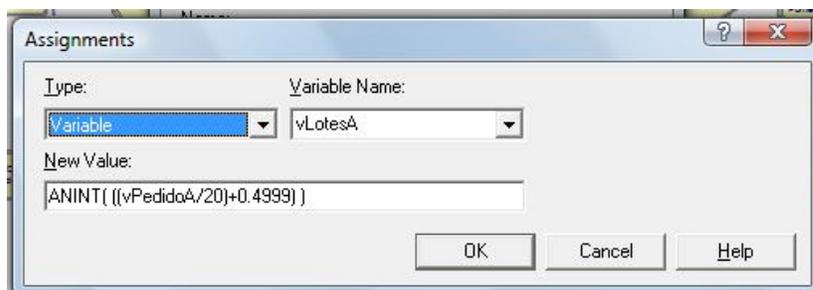


Figura 4 - Módulo ASSIGN responsável por calcular o número de containers a ser pedido.

O segundo cálculo atualiza o valor do saldo em estoque para o dia seguinte, subtraindo o valor da demanda, conforme Figura 5.

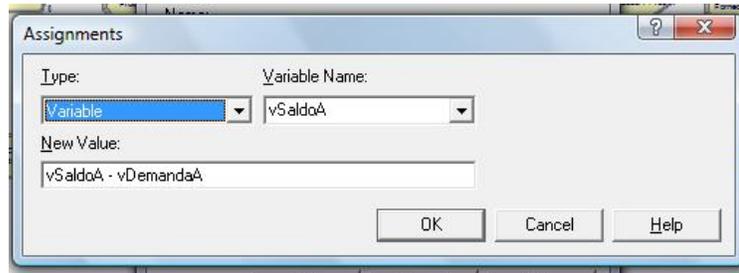


Figura 5 - Módulo ASSIGN responsável por atualizar o saldo em estoque, subtraindo a demanda do dia.

Após o cálculo dessas variáveis, um módulo SEPARATE aumenta o número de entidades no sistema, de forma que cada entidade represente a demanda por um *container* do produto, como mostrado na Figura 4.10. Para realizar isso, é gerada uma quantidade igual a 'vLotesA - 1' entidades, de forma que o número total de entidades seja igual ao valor de 'vLotesA', definido pelo módulo ASSIGN mostrado na Figura 4.

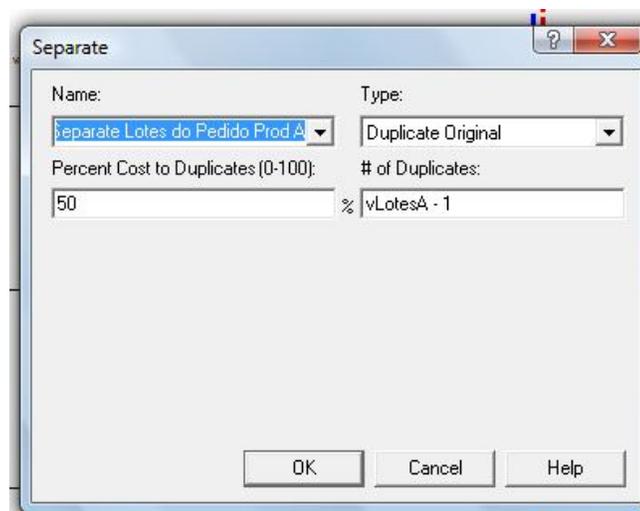


Figura 6 - Módulo SEPARATE responsável pela geração de um número de entidades igual ao número de containers pedidos pelo cliente.

Cada uma das entidades criadas, juntamente com a entidade original, é enviada a um módulo DECIDE, que verificará se cada *container* do produto pedido está disponível no estoque do fornecedor ou não. A Figura 7 ilustra a verificação.

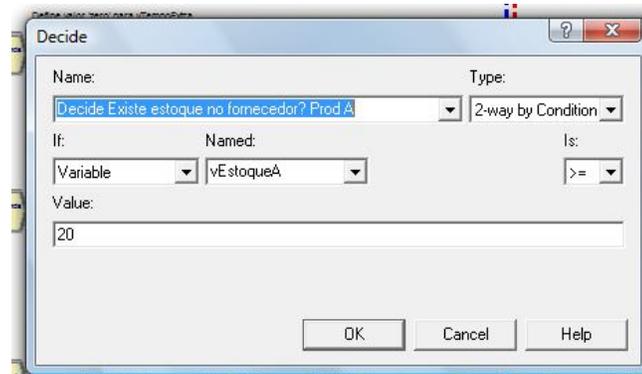


Figura 7 - Módulo DECIDE responsável por verificar a disponibilidade do produto em estoque.

Para que cada *container* pedido seja atendido, o estoque do produto deverá ser maior do que o valor de 20 peças, já que essa é a quantidade de peças padrão por *container*. Caso o pedido (*container*) puder ser atendido, o estoque do produto no fornecedor será reduzido em 20 unidades (Figura 8), o saldo em estoque do cliente será aumentado igualmente em 20 unidades (Figura 8), e um sinal será enviado para o fornecedor (Figura 9) indicando uma redução no estoque e possibilidade de reposição futura. Dessa forma, a lógica de sinalização da necessidade de reposição dos supermercados de um sistema kanban é simulada. Mais adiante a lógica que descreve a produção e reposição dos estoques será descrita.

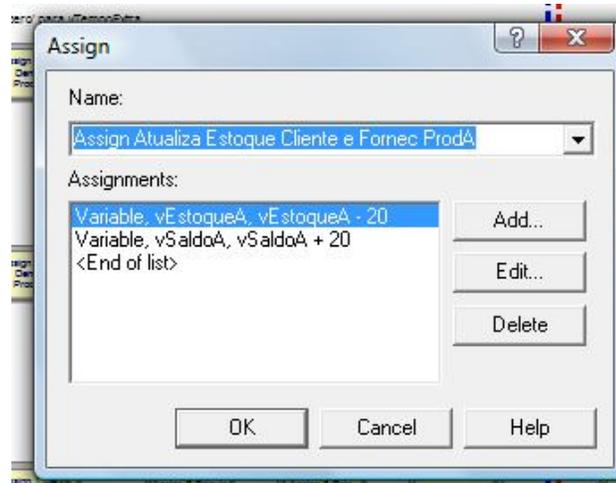


Figura 8 - Módulo ASSIGN que redefine o nível de estoque do fornecedor e o nível de estoque do cliente.

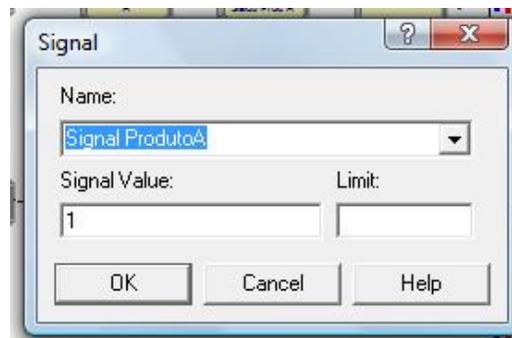


Figura 9 - Módulo SIGNAL que sinaliza a redução do estoque e a possibilidade de reposição futura através de um sistema kanban.

Caso o estoque disponível não seja suficiente para atender ao pedido de um *container*, os estoques do fornecedor e do cliente não são alterados. Em ambos os casos, o número de pedidos (por *container*) atendidos e perdidos é contabilizado, através de módulos RECORD. A Figura 10 fornece uma visão geral dos módulos responsáveis pela geração de demanda e atendimento dos pedidos, descritos até este momento.

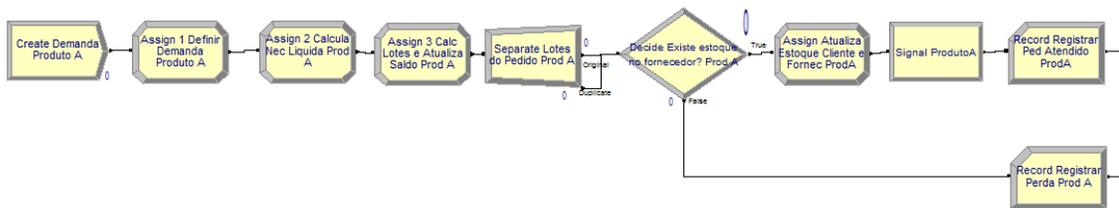


Figura 10 - Visão geral do processo de geração da demanda e atendimento dos pedidos do cliente para um produto.

Por fim, o nível de serviço, medido em número de *containers* atendidos ou perdidos, é contabilizado por um módulo ASSIGN, e as entidades são eliminadas do sistema por um módulo DISPOSE.

2 Produção e reposição dos estoques

Assim como na seção anterior, a lógica do software Arena será descrita para o produto 'A'. Os demais produtos possuem lógica semelhante, exceto nos casos em que for mencionado.

No início do período de simulação, um módulo CREATE gera entidades no sistema que funcionarão como cartões kanban. A quantidade de cartões de cada produto corresponde ao estoque máximo permitido, e que pode variar em cada simulação. Na verdade, essa é uma das variáveis do experimento. Todas as entidades que representam os cartões kanban serão geradas no início da simulação.

As entidades criadas são enviadas a um módulo HOLD, responsável por mantê-las retidas até que haja um sinal liberando-as, como mostrado na Figura 11.

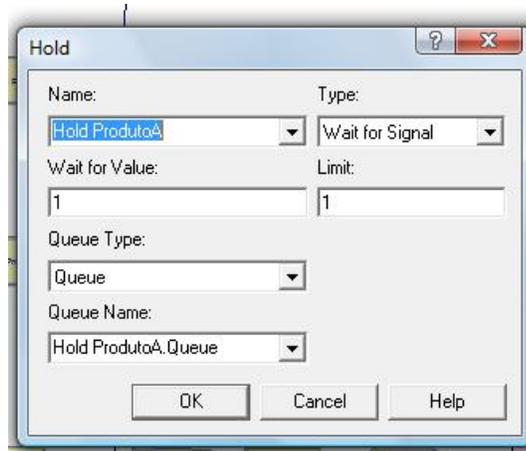


Figura 11 - Módulo HOLD responsável por reter as entidades até que um sinal seja enviado.

O sinal é enviado pelo módulo SIGNAL descrito na seção anterior e mostrado na Figura 9. Como dito anteriormente, cada vez que o estoque é reduzido em um *container*, um sinal é enviado e um cartão kanban é liberado pelo módulo HOLD, de forma a limitar a quantidade de material no processo. Se um sinal não for enviado, as entidades (representando cartões) não serão liberadas e a produção não poderá ser realizada.

As entidades liberadas são enviadas a um módulo BATCH, para que um lote seja formado. Como discutido na seção 4.1.5, a produção só deve ser realizada uma vez que a faixa verde do quadro esteja completamente ocupada por cartões (ou seja, o estoque se encontre nas faixas amarela ou vermelha). Assim, o tamanho do lote necessário a ser formado no módulo BATCH é igual ao tamanho da faixa verde de cada produto, como mostrado na Figura 12. Nesse caso, a variável 'vVerde' é dividida pela constante '20', para que o resultado seja em número de cartões. A multiplicação pela constante '3' é utilizada como artifício para o produto 'A' já que a demanda diária média do produto é de 240 peças. Para produtos com menor demanda, a constante pode assumir valor '2' ou '1'.

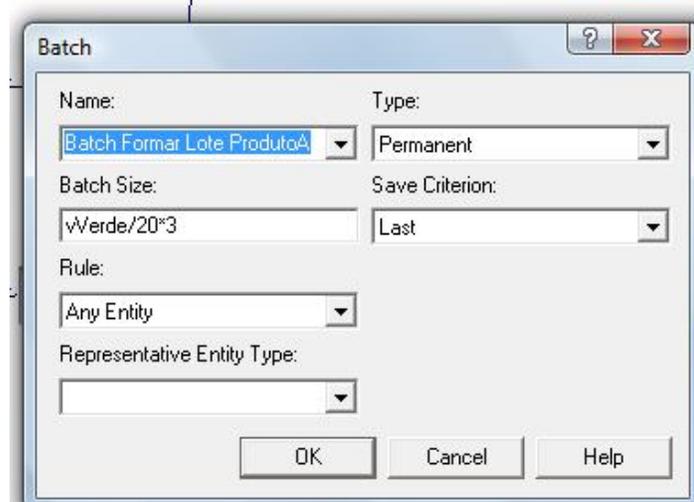


Figura 12 - Módulo BATCH responsável por formar um lote igual ao tamanho da faixa verde do quadro.

Na sequência, a entidade (que agrupa um lote de cartões) é enviada a um módulo DELAY, cuja espera é de 0,001 segundos. Esse módulo não tem função correspondente a um sistema kanban, sendo apenas um artifício para que todos os lotes de produção sejam formados (os pedidos e lotes de todos os produtos são formados no mesmo instante do relógio do simulador).

Em seguida, a entidade que representa o lote de cartões é enviada a um módulo ASSIGN onde dois parâmetros serão calculados. O primeiro deles é chamado 'aTamanhoLote', que especifica a quantidade de cartões agrupados na entidade. Essa informação será utilizada posteriormente durante a produção deste lote. Vale lembrar que, até o momento, todos os parâmetros calculados eram variáveis, e que este é um atributo (específico da entidade que passa pelo módulo e não uma variável que possui um valor único num dado instante). O valor de 'aTamanhoLote' corresponde ao tamanho da faixa verde, presente também no módulo BATCH.

O segundo atributo definido também no mesmo módulo ASSIGN chama-se 'aSeqProducao'. Este segundo atributo é definido pela razão entre o nível de estoque do produto no momento e o estoque máximo dimensionado do produto. Esse atributo é utilizado para avaliar o tempo de cobertura do estoque do produto. Assim, quanto menor a razão, mais crítica é a necessidade de reposição do estoque. O atributo 'aSeqProducao' será utilizado a seguir, na lógica que representa a

produção dos produtos. A Figura 13 mostra uma visão geral da lógica utilizada para definir a liberação dos cartões kanban, formação de lotes e definição de atributos das entidades para cada produto.

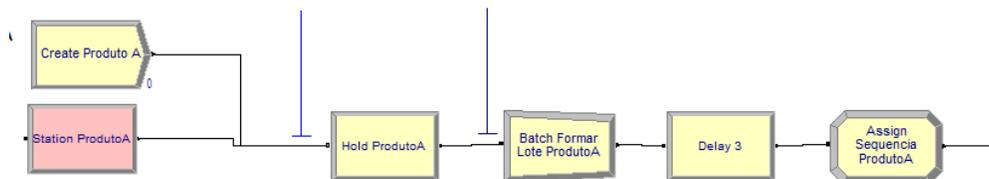


Figura 13 - Visão geral da lógica que descreve a liberação dos cartões, formação de lotes e definição dos atributos das entidades.

Cada módulo de lógica mostrado na Figura 13 se repete para cada um dos 10 produtos do sistema. Entretanto, as entidades, após passar por todos os módulos de lógica mostrados na Figura 13 são enviados para um único módulo PROCESS, que representa uma estação de trabalho capaz de processar somente um lote de produtos por vez. Como o lote de reposição de todos os produtos que atingiram as faixas amarela ou vermelha são enviados no mesmo instante para a estação de trabalho, haverá uma fila de material em processo, de forma que deve haver algum critério de priorização do material em processo. Assim, o atributo 'aSeqProducao' definido anteriormente para cada um dos lotes é utilizado, de forma que a estação de trabalho prioriza o produto com menor valor do atributo (menor tempo de cobertura de estoque) conforme mostra a Figura 14.

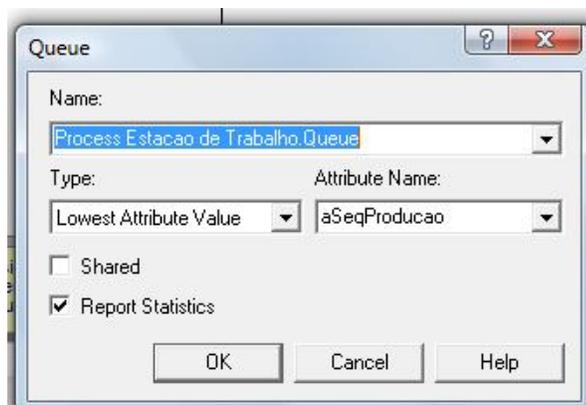


Figura 14 - Lógica que prioriza o lote cujo valor do atributo 'aSeqProducao' é o menor.

Dessa forma, garante-se que a reposição dos estoques seja realizada primeiramente para os produtos que estejam na faixa vermelha, e só em seguida para os produtos que estejam na faixa amarela. Caso dois produtos se encontrem na mesma faixa, o uso do atributo 'aSeqProducao' prioriza o produto que possuir menor estoque em relação ao máximo dimensionado (menor tempo de cobertura). Para os produtos que estiverem na faixa verde, a produção de um lote não será autorizada, e as entidades (representando os cartões kanban liberados devido a baixas no estoque) permanecerão esperando junto ao módulo BATCH descrito anteriormente. A reposição de estoques de produtos que estejam na faixa verde, visando o uso de tempos ociosos na estação de trabalho, será descrita posteriormente, já que a lógica de simulação utilizada para esse fim é distinta da apresentada nessa seção.

Priorizado o produto, a estação de trabalho (módulo PROCESS) realiza produção de cada lote. O tempo de processo de cada lote é definido por duas parcelas, como pode ser visto na Figura 15.

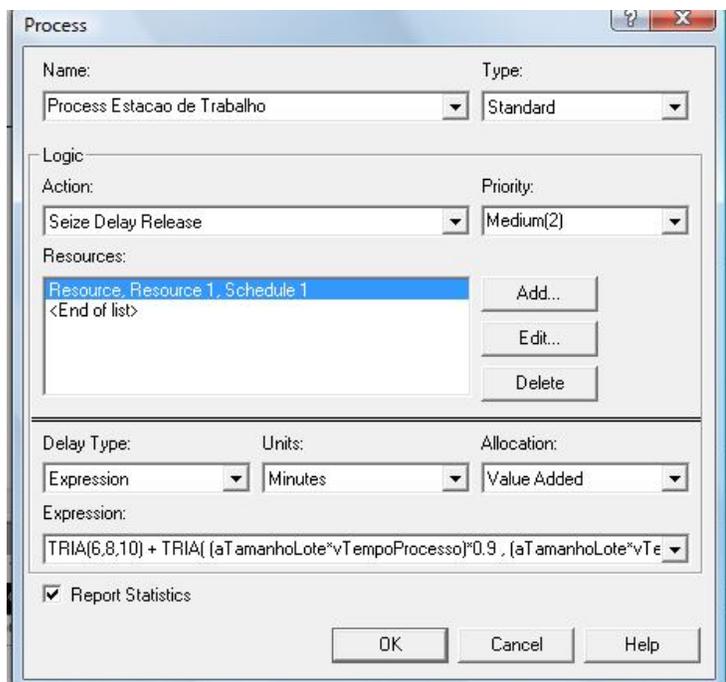


Figura 15 - Módulo PROCESS.

A primeira parcela diz respeito ao tempo de setup de um produto para outro, definido por uma distribuição triangular cuja média é de 8 minutos, tendo como máximo e

mínimo os tempos de 10 e 6 minutos, respectivamente. A segunda parcela representa o tempo de produção propriamente dito, que também é definido por uma distribuição triangular cuja moda é calculada pela multiplicação do atributo 'aTamanhoLote' pela variável 'vTempoProcesso'. Conforme mencionado anteriormente, o atributo 'aTamanhoLote' corresponde ao número de *containers* que compõe o lote de produção de cada produto, que varia em função de demanda diária média. A variável 'vTempoProcesso' corresponde ao tempo de produção médio necessário para se produzir um *container*. A definição da variável 'vTempoProcesso' será mostrada mais adiante. Assim, quanto maior o valor de 'vTempoProcesso', menor a capacidade da estação de trabalho. A distribuição triangular que define o tempo de produção, sem considerar o tempo de setup, possui valor máximo 10% maior do que a média, e valor mínimo 10% menor do que a média da distribuição.

Após a produção a entidade é enviada para um módulo DECIDE, de forma que cada tipo de produto retorna a um conjunto de módulos específico para cada produto, como pode ser visto na Figura 16. A separação por tipo de produto é possível já que diferentes tipos de entidades são definidos nos módulos CREATE que as geram.

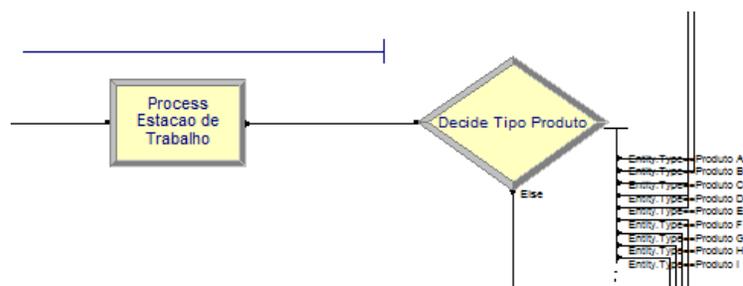


Figura 16 - Módulos PROCESS e DECIDE.

A visão geral desses módulos específicos é mostrada na Figura 16. Novamente, a estrutura criada para o produto 'A' será utilizada como exemplo. A função desses módulos é atualizar os níveis dos estoques, uma vez que a produção já foi realizada.

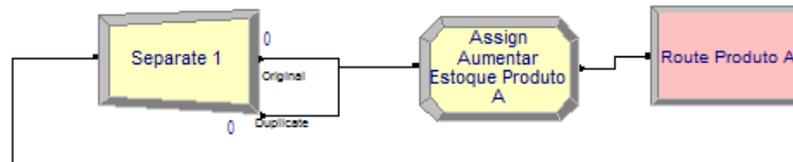


Figura 17 - Visão geral dos módulos responsáveis por atualizar os estoques dos produtos após sua produção.

Uma entidade representando o lote de produção é enviada a um módulo SEPARATE. Para que a atualização dos estoques seja realizada de forma correta, e para que o número de cartões kanban de cada produto seja reestabelecido no sistema, o lote de cartões anteriormente formado é desagrupado, utilizando o mesmo tamanho de lote definido anteriormente. Assim, o módulo SEPARATE envia as entidades para o módulo ASSIGN, mostrado na Figura 17, que irá realizar a atualização dos estoques, utilizando a lógica mostrada na Figura 18. Cada entidade enviada ao módulo ASSIGN aumenta o estoque em 20 unidades, o que corresponde a quantidade de peças por *container*.

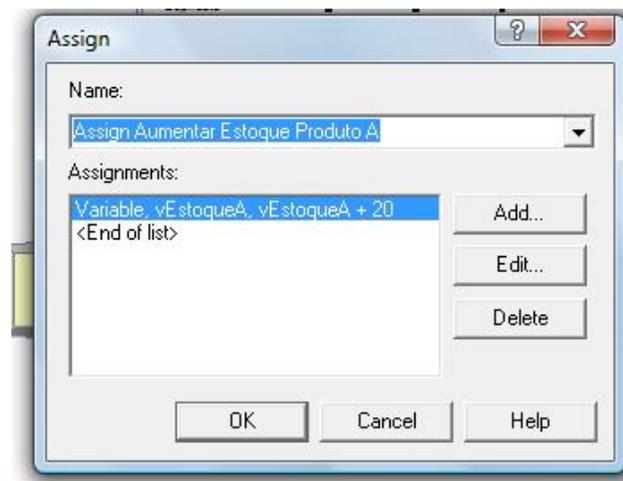


Figura 18 - Módulo ASSIGN responsável por atualizar os estoques.

Por fim, após a atualização dos estoques, as entidades são enviadas novamente para o módulo HOLD descrito anteriormente, utilizando módulos ROUTE e STATION, esperando um sinal gerado por novas reduções nos estoques para que a produção possa ser novamente autorizada.

3 Controle de horas extras

Horas extras serão realizadas sempre que, ao final do turno normal de trabalho, o estoque de ao menos um produto se encontrar na faixa amarela ou vermelha. Para monitorar o número de dias em que horas extras são realizadas, um novo conjunto de módulos é criado, como mostrado na Figura 19.

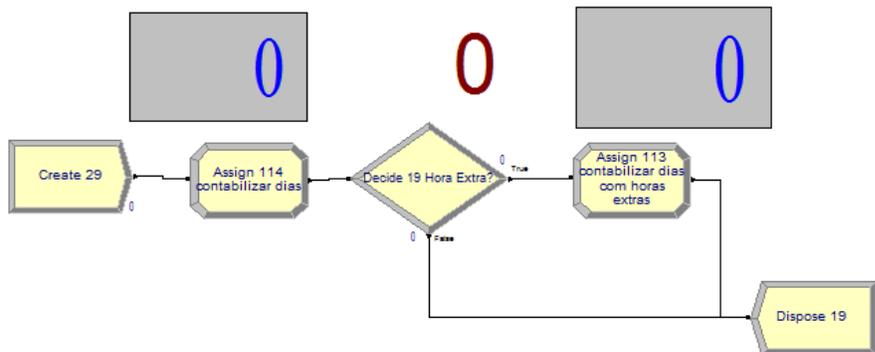


Figura 19 - Visão geral dos módulos responsáveis por monitorar a realização de horas extras.

Diariamente, um módulo CREATE gera uma entidade. A criação desta entidade ocorre exatamente no instante em que o turno normal de trabalho termina. Ela é enviada a um módulo ASSIGN, onde existe um contador dos dias trabalhados. O módulo seguinte, DECIDE, monitora a quantidade de material em processo na estação de trabalho. Se o estoque em processo for maior do que zero, este é um indicativo de que estação de trabalho permanece em operação, e que horas extras serão realizadas nesse dia a partir desse instante. A Figura 20 mostra o módulo DECIDE.

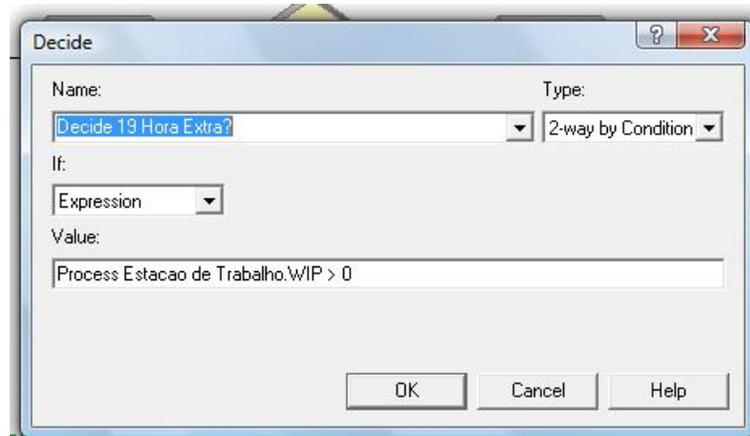


Figura 20 - Módulo DECIDE que avalia o material em processo na estação de trabalho.

Para cada dia em que horas extras forem realizadas, um contador em um módulo ASSIGN registra a ocorrência. Em ambos os casos, a entidade é posteriormente eliminada através de um módulo DISPOSE. Para avaliar a incidência de horas extras ao final da simulação, as duas variáveis (número de dias simulados e número de dias com horas extras) serão comparadas.

4 Uso da ociosidade da estação de trabalho

Utilizando somente a lógica descrita na Seção 2, poderá haver ociosidade na estação de trabalho ao final do turno normal ou durante o período de horas extras, uma vez que somente os produtos que atingiram as faixas amarela ou vermelha devem ser produzidos. Para minimizar a ociosidade da estação de trabalho nas ocasiões em que os estoques dos produtos não estiverem no nível máximo dimensionado, uma lógica de simulação adicional foi criada.

A seguir, será descrita a lógica que utiliza os tempos ociosos na produção do produto 'A'. Os demais produtos possuem lógica semelhante.

Diariamente, uma entidade será gerada após o início da produção em turno normal por um módulo CREATE. Essa entidade é enviada até um módulo HOLD, onde permanece até que a estação de trabalho termine a produção de todos os lotes dos produtos e se encontre ociosa. Isso é realizado pelo monitoramento do estoque em processo na estação de trabalho, como pode ser visto na Figura 21.

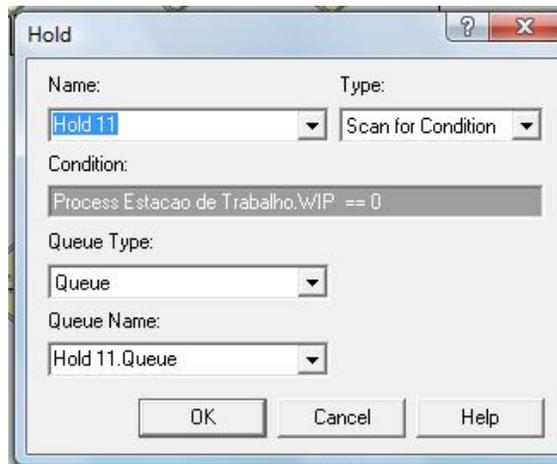


Figura 21 - Módulo HOLD que monitora o material em processo na estação de trabalho.

Quando a ociosidade é verificada, a entidade é liberada e enviada até um módulo DELAY. Esse módulo não tem significado num sistema real, sendo somente um artifício do modelo de simulação. O tempo de espera é o valor, em segundos, da razão entre o estoque atual do produto e o máximo dimensionado. Esta razão é a mesma que define o atributo 'aSeqProducao', descrito na Seção 2, utilizado para priorizar o produto cujo estoque esteja em situação mais crítica. Assim, o produto cujo estoque esteja em situação mais crítica será liberado pelo módulo DELAY mais cedo (em relação às entidades existentes na lógica dos outros produtos), e dessa forma a priorização de produto será realizada.

Após a liberação pelo módulo DELAY, um módulo ASSIGN verifica qual a diferença entre o estoque atual do produto e seu estoque máximo, em número de containers. Essa diferença corresponde a quantidade de cartões existentes no quadro para o produto. Para isso utiliza-se o atributo 'aTamanhoLote'. Se estoque estiver completo,

o valor de 'aTamanhoLote' será zero. Caso o estoque não esteja completo, o valor será maior do que zero, assumindo valores inteiros positivos.

Em seguida, a entidade é enviada a um módulo DECIDE, que avalia o valor de 'aTamanhoLote', como mostrado na Figura 22.

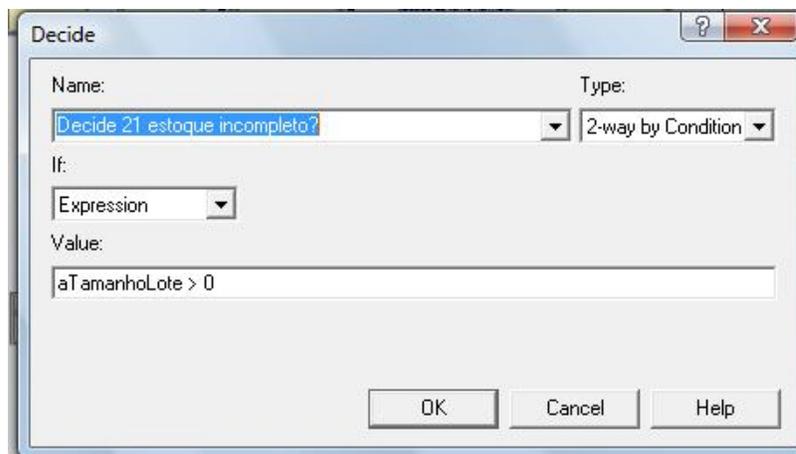


Figura 22 - Módulo DECIDE que avalia o atributo 'aTamanhoLote'.

Caso o estoque do produto não esteja completo, a entidade prossegue no sistema. Caso contrário, ela é eliminada por um módulo DISPOSE.

Os módulos descritos nessa seção são referentes ao produto 'A', sendo repetidos para cada tipo de produto. Os módulos descritos a seguir são únicos, pois se referem a todos os produtos.

Na sequência, um novo módulo DECIDE avalia se o instante atual do relógio do simulador faz parte do turno normal do trabalho ou se o intervalo de horas extras do dia já foi invadido. Isso é realizado pela expressão mostrada na Figura 23. A variável 'Tnow' possui o valor do relógio do simulador no instante em que a entidade chega ao módulo onde a variável estiver sendo utilizada. A variável 'vDias' contabiliza o número de dias simulados na replicação atual. Dessa forma, o simulador define se o instante atual pertence ao turno normal de trabalho, ou se o período de horas extras já foi iniciado.

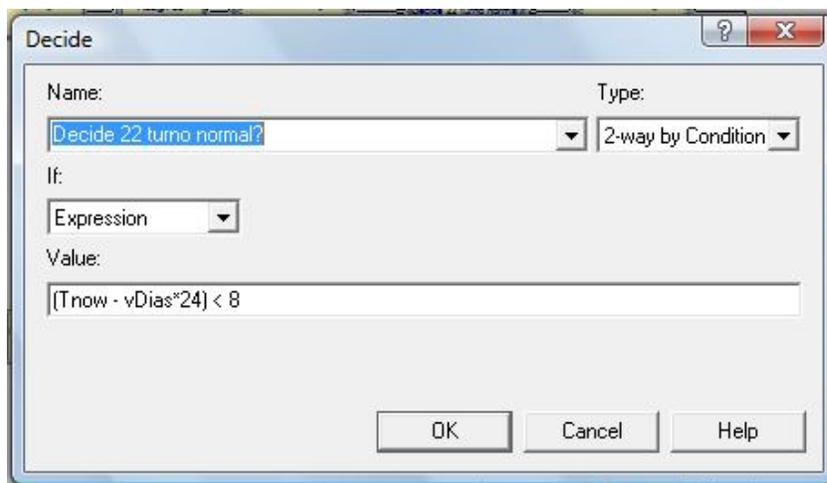


Figura 23 - Módulo HOLD que verifica a realização de horas normais ou horas extras.

Caso a produção definida pelo primeiro sequenciamento tenha sido concluída no período de horas normais, um módulo ASSIGN definirá que a variável 'vTempoDisponivel' possui valor 8. O módulo é mostrado na Figura 24. Caso o período de horas extras já tenha sido utilizado, a variável 'vTempoDisponivel' possuirá valor 10. O módulo é mostrado na Figura 25. O uso da variável 'vTempoDisponivel' será explicado mais adiante.

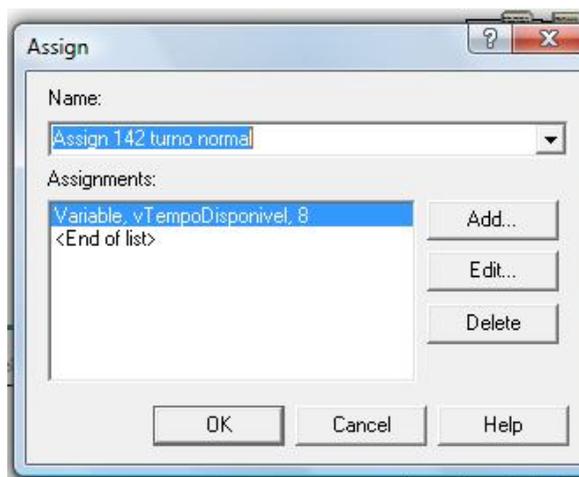


Figura 24 - Módulo ASSIGN que define o valor da variável 'vTempoDisponivel' quando horas extras não foram iniciadas.

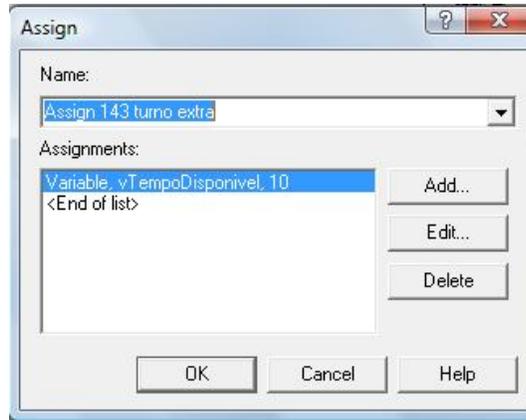


Figura 25 - Módulo ASSIGN que define o valor da variável 'vTempoDisponivel' quando horas extras já foram iniciadas.

Em seguida, é utilizado um módulo HOLD, capaz de reter o avanço das entidades pela lógica do sistema e mostrado pela Figura 26. Ele é utilizado para que exista somente uma entidade pelos módulos de lógica descritos a seguir. Dessa forma, o processo descrito posteriormente será repetido para cada um dos 10 produtos do sistema, desde que a reposição dos estoques ainda possa ser realizada.

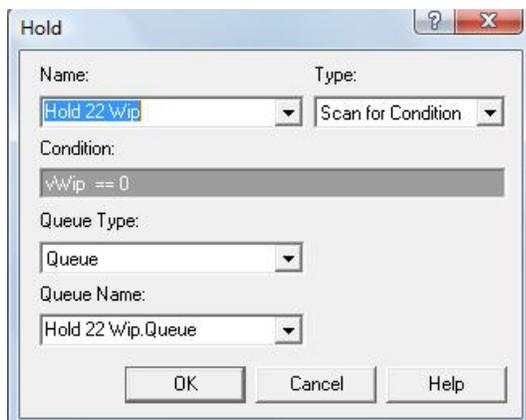


Figura 26 - Módulo HOLD que limita o número de entidades na lógica do modelo.

Uma vez liberada, a entidade passa por um módulo ASSIGN, utilizado para evitar que outras entidades sejam liberadas pelo módulo HOLD até que estas sejam eliminadas do sistema. A Figura 27 ilustra o módulo ASSIGN.

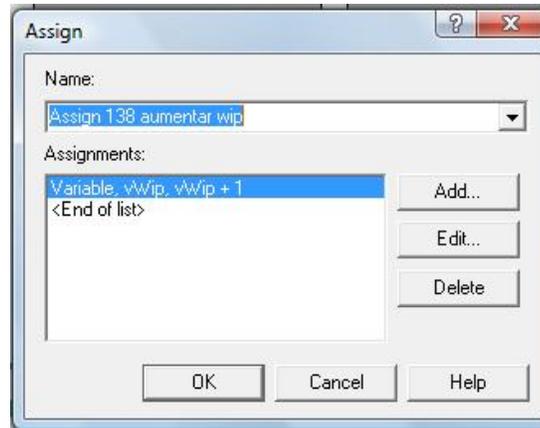


Figura 27 - Módulo ASSIGN que evita a liberação de outras entidades na lógica do sistema.

A entidade é então enviada a um módulo DECIDE, que verifica se existe tempo suficiente para a realização de um setup na estação de trabalho. Assim, será iniciada a utilização da estação de trabalho depois que o primeiro sequenciamento de produção seja realizado. O módulo DECIDE compara o tempo atual do relógio do simulador com o tempo total disponível definido pela variável 'vTempoDisponivel' mostrada anteriormente, subtraindo o tempo necessário para a realização do setup. Uma vez que o tempo de setup é definido por uma distribuição triangular, utiliza-se o tempo máximo de setup de 10 minutos nessa avaliação. A constante '60' é utilizada para converter o tempo de setup em horas. A Figura 28 mostra o módulo DECIDE responsável por essa análise.

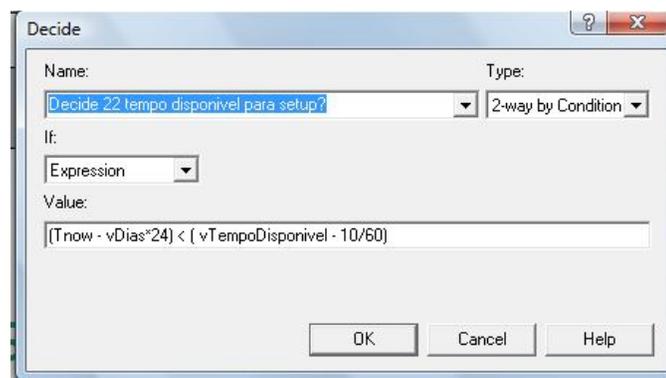


Figura 28 - Módulo DECIDE que verifica se existe tempo suficiente para a realização de um setup na estação de trabalho.

Se houver tempo disponível, a entidade é enviada a um módulo DELAY, que atrasa a entidade, representando a realização do setup na estação de trabalho. O tempo de atraso é definido pela distribuição triangular que representa a troca. A Figura 29 mostra o módulo DELAY com essa função. Se não houver tempo disponível, a entidade é eliminada do sistema por um módulo DISPOSE.

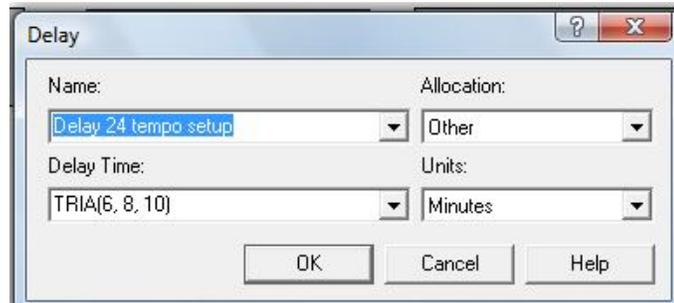


Figura 29 - Módulo DELAY que atrasa a entidade e representa o tempo de realização de um setup.

Após a realização do setup, uma nova verificação do tempo disponível é realizada, semelhante a verificação mostrada pelo módulo DECIDE anterior, dessa vez para avaliar é possível produzir um *container* do produto. De forma semelhante, o módulo DECIDE compara o tempo atual do relógio do simulador com o tempo total disponível definido pela variável 'vTempoDisponivel', subtraindo o tempo de produção de um *container*. Nessa verificação, utiliza-se o maior tempo de possível para a produção do *container*, uma vez que sua duração é definida por uma distribuição triangular. A Figura 30 mostra o módulo DECIDE com essa função.

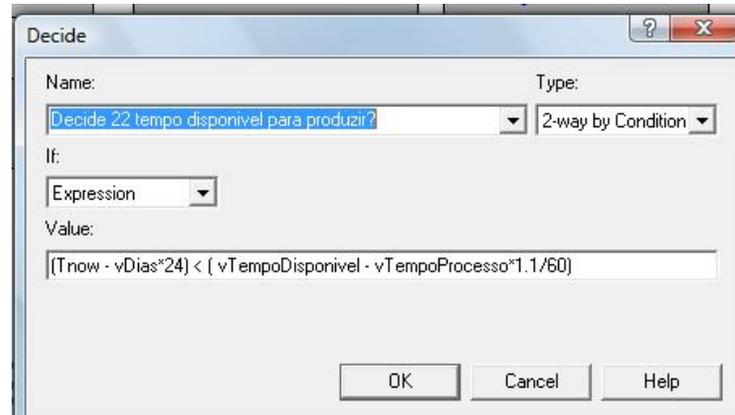


Figura 30 - Módulo DECIDE que avalia o tempo disponível para se produzir um container do produto.

Se houver tempo suficiente, a entidade é enviada a um módulo PROCESS, mostrado na Figura 31, que representa a estação de trabalho, onde um *container* do produto será produzido. Se não houver tempo suficiente, a entidade será eliminada do sistema.

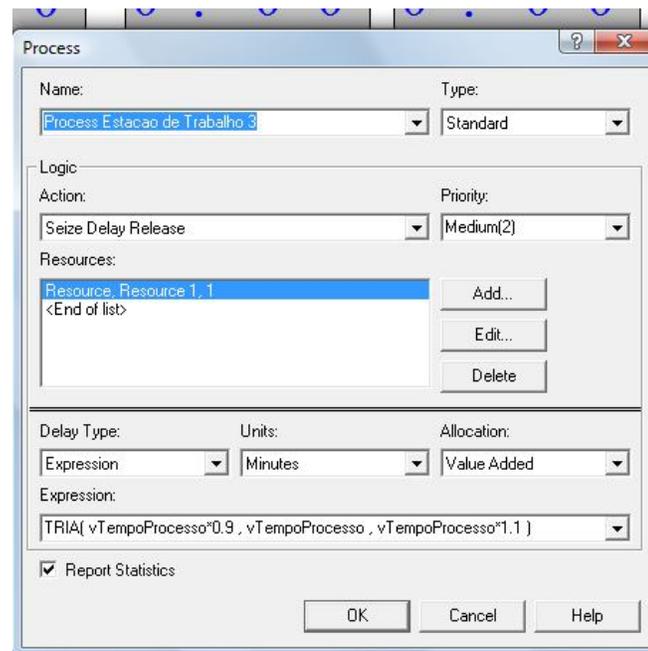


Figura 31 - Módulo PROCESS que representa a estação de trabalho.

Se os módulos DECIDE mostrados avaliarem que o tempo é insuficiente para a realização de um setup ou para produzir um *container* do produto, as entidades serão eliminadas do sistema, porém antes sinalizam a possibilidade de uma nova entidade ser liberada pelo módulo HOLD mostrado anteriormente na Figura 26.

Após a produção do *container* do produto, a entidade é enviada a um módulo DECIDE, que verifica qual o produto representado pela respectiva entidade. Em seguida, a entidade é enviada para um conjunto de módulos específicos de seu produto, onde os níveis de estoque e movimentação dos cartões devem ser realizados. A lógica mostrada a seguir novamente representa o produto 'A'. Os demais produtos apresentam lógica semelhante.

Um módulo ASSIGN deve aumentar o estoque em 20 unidades, que é a quantidade de peças em cada *container*, semelhante ao módulo mostrado anteriormente pela Figura 18.

Em seguida, um módulo REMOVE, mostrado pela Figura 32, retira uma entidade (que representa um cartão kanban) do módulo BATCH produto 'A', mostrado pela anteriormente na Figura 12. Isso é realizado já que um novo *container* foi produzido, e um cartão kanban deve ser retirado do quadro. A entidade removida do módulo BATCH é enviada novamente ao módulo HOLD produto 'A', mostrado na Figura 11, que representa o *container* disponível em estoque. A entidade original que atravessa a lógica descrita nessa seção é enviada a um módulo DECIDE.



Figura 32 - Módulo REMOVE utilizado na lógica do produto 'A'.

O módulo DECIDE verifica se todos os cartões do produto 'A' foram retirados do quadro kanban, o que significaria que o estoque do produto foi totalmente reposto. O módulo é mostrado na Figura 33. A constante '3' na expressão é um artifício utilizado para adequar a lógica para o produto 'A'. Produtos com menor demanda diária média utilizam as constantes '2' ou '1'.

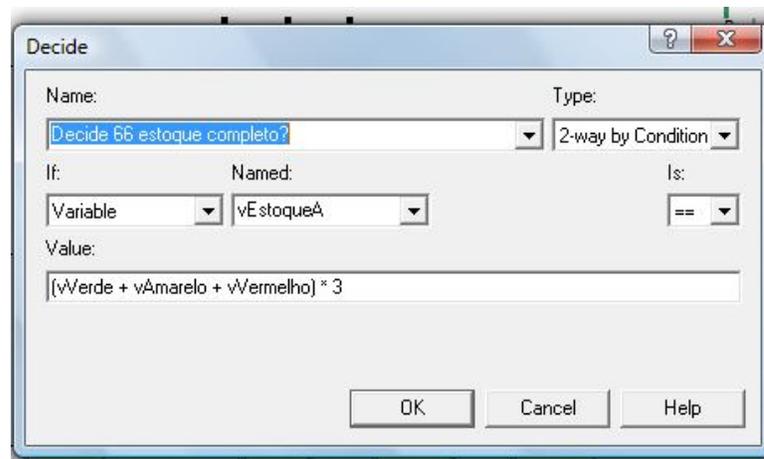


Figura 33 - Módulo DECIDE que verifica se todos os cartões do produto foram retirados do quadro.

Se não existirem mais cartões no quadro kanban para esse produto, a entidade será eliminada do sistema, permitindo a entrada de outra entidade referente a outro produto que necessita ser reposto. Nesse caso, as mesmas verificações descritas anteriormente quanto ao tempo necessário para realizar setup e produção de um *container* devem ser realizadas.

Se ainda existirem cartões no quadro para o produto 'A', a entidade será enviada de volta ao módulo DECIDE mostrado na Figura 30, onde será verificado se existe tempo suficiente para a produção de um novo *container* do produto. Por se tratar do mesmo produto, não é necessário realizar um novo setup.

As verificações do tempo disponível para setup e produção *container* a *container* serão realizadas novamente, até que todos os produtos tenham sido completamente repostos, ou até que o turno de trabalho seja encerrado.

5 Definição da capacidade da estação de trabalho

Conforme mencionado, a estação de trabalho deverá apresentar diversos níveis de capacidade em cada cenário simulado. A Tabela 4.4 apresentou os tempos de ciclo por *container*, para cada nível de capacidade de produção. Esses valores serão utilizados no modelo de simulação, como a variável 'vTempoProcesso', conforme mostrado na Figura 15.

Nas situações em que a capacidade for insuficiente para produzir e concluir o primeiro sequenciamento de produção realizado diariamente, um mecanismo de restrição de capacidade deve ser criado, de forma a interromper a produção após as 10 horas disponíveis por dia. Quando isso acontecer, haverá material em processo na estação de trabalho no final do período, permanecendo até o início da produção no dia seguinte.

Um padrão de tempo é criado, podendo ser visto na Figura 34. A programação de tempo criada atribui capacidade '1' para a estação de trabalho nas 10 primeiras horas de cada dia (8 horas normais e 2 extras), e capacidade '0' nas 14 horas restantes do dia.

