Campus de São Carlos

UM ESTUDO SOBRE OS RELACIONAMENTOS
ENTRE FORMAS DE DISTRIBUIÇÃO DA
CAPACIDADE PRODUTIVA E SISTEMAS E
PROGRAMAÇÃO E CONTROLE DA PRODUÇÃO

FERNANDO BERNARDI DE SOUZA

Orientador: Prof. Dr. Oswaldo Luis Agostinho

VOLUME I

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

**ESCOLA DE ENGENHARIA
DE SÃO CARLOS**

UM ESTUDO SOBRE OS RELACIONAMENTOS ENTRE FORMAS DE DISTRIBUIÇÃO DA CAPACIDADE PRODUTIVA E SISTEMAS DE PROGRAMAÇÃO E CONTROLE DA PRODUÇÃO

VOLUME I

FERNANDO BERNARDI DE SOUZA

Tese apresentada à Escola de Engenharia
de São Carlos, da Universidade de São
Paulo, como parte dos requisitos para
obtenção do título de Doutor em
Engenharia Mecânica

Serviço de Pós-Graduação EESC/USP

EXEMPLAR REVISADO

Data de entrada no Serviço: 18/02/02

Ass.: *J. Chame*

ORIENTADOR: Prof. Dr. Oswaldo Luiz Agostinho
CO-ORIENTADOR: Prof. Dr. Antonio Freitas Rentes

São Carlos
2001

DEDALUS - Acervo - EESC

31100036872

Class.	TESE - EESC
Curr.	5803
	v. 1
Tombo	T0045/02

at 1231996

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento
da Informação do Serviço de Biblioteca – EESC/USP

S729e

Souza, Fernando Bernardi de

Um estudo sobre os relacionamentos entre formas de distribuição da capacidade produtiva e sistemas de programação e controle da produção / Fernando Bernardi de Souza. -- São Carlos, 2001.

Tese (Doutorado) -- Escola de Engenharia de São Carlos-Universidade de São Paulo, 2001.

Área: Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Oswaldo Luiz Agostinho.

Co-orientador: Prof. Dr. Antonio Freitas Rentes.

1. Alocação de capacidades . 2. Desbalanceamento da produção. 3. Fenômeno bowl. 4. Planejamento e controle de produção. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **FERNANDO BERNARDI DE SOUZA**

Tese defendida e julgada em 20-12-2001 perante a Comissão Julgadora:

Prof. Dr. **OSWALDO LUIZ AGOSTINHO (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

aprovado

Prof. Dr. **LUIZ CÉSAR RIBEIRO CARPINETTI**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

aprovado

Profa. Dra. **MARIA CREUSA BRETAS SALLES**
(Instituto de Ciências Matemáticas e Computação/USP)

aprovado

Prof. Livre-Doc. **PAULO CORREA LIMA**
(Universidade Estadual de Campinas/UNICAMP)

Aprovado

Prof. Dr. **SILVIO ROBERTO IGNÁCIO PIRES**
(Universidade Metodista de Piracicaba/UNIMEP)

APROVADO

Prof. Associado **ARTHUR JOSÉ VIEIRA PORTO**
Coordenador do Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Mecânica

JOSÉ CARLOS A. CINTRA
Presidente da Comissão de Pós-Graduação

A meus pais,
pelo amparo e estímulo
ao longo destes anos

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelos recursos concedidos, sem os quais esta pesquisa se tornaria inviável.

Ao Professor Oswaldo Luiz Agostinho, por suas importantes contribuições no papel de orientador desta pesquisa..

Ao Professor Antonio Freitas Rentes, pelas opiniões sempre cabíveis ao longo do trabalho e co-orientação desta tese.

À Professora Creusa Bretas Salles, por suas relevantes contribuições no que tange ao planejamento de experimentos de simulação.

Aos meus colegas, professores e funcionários do Departamento de Engenharia Mecânica e do Departamento de Engenharia de Produção da EESC.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	i
LISTA DE TABELAS.....	x
RESUMO	xvii
ABSTRACT.....	xviii
1. INTRODUÇÃO E CONTEXTUALIZAÇÃO	1
1.1. Objetivo do trabalho.....	4
1.2 Metodologia de pesquisa e desenvolvimento do trabalho	6
1.3 Estrutura do texto	9
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	10
2.1 Os métodos de alocação de capacidades entre recursos de manufatura	10
2.1.1 O fenômeno <i>bowling</i>	11
2.1.2 Outros estudos sobre desbalanceamento de linhas de produção	19
2.2 Os sistemas de planejamento e controle da produção.....	28
2.2.1 O sistema Kanban	28
2.2.2 O SISTEMA CONWIP.....	35
2.2.3 O método tambor-pulmão-corda (<i>drum-buffer-rope</i>).....	42
2.2.4 Comparações entre sistemas de gestão da produção e suas respectivas abordagens de projeto de linhas.....	52
3. PLANEJAMENTO DO ESTUDO COMPARATIVO	59
3.1. Definição do domínio de aplicação.....	59
3.2. Obtenção de um modelo de ambiente produtivo.....	59
3.3. Total de modelos utilizados na pesquisa.....	68
3.3.1 Número de modelos simulados	70
3.4 Modelagem dos sistemas de PCP.....	71
3.4.1 O sistema ROP	72

3.4.2 O sistema Kanban	72
3.4.3 O sistema CONWIP	74
3.4.4 O sistema Tambor-Pulmão-Corda.....	74
3.5 Seleção do método de pesquisa	75
3.6 Criação e validação dos modelos	77
3.7 Planejamento de experimentos.....	78
3.7.1 Aplicação à pesquisa.....	83
4. EXECUÇÃO DO ESTUDO COMPARATIVO	86
4.1 Simulação dos modelos.....	86
4.2 Estratégia para análise dos resultados.....	87
4.2.1 Estratégia para análise dos resultados tendo como interesse o nível de WIP médio	88
4.2.2 Estratégia para análise dos resultados tendo como interesse o nível de WIP máximo.....	94
4.3 Resultados gerados e análises preliminares.....	94
4.4 Análise dos resultados.....	95
4.4.1 Análise dos resultados baseada na hipótese 1	95
4.4.2 Análise dos resultados baseada na hipótese 2	115
4.4.3 Análise dos resultados baseada na hipótese 3	133
4.4.4 Análise dos resultados baseada na hipótese 4	140
4.4.5 Análise dos resultados baseada na hipótese 5	141
5. CONCLUSÕES GERAIS, Aplicações Práticas, e trabalhos FUTUROS.....	143
5.1 Conclusões gerais.....	144
5.1.1 Os critérios de alocação de capacidades.....	148
5.1.2 As políticas de PCP.....	151
5.2 Aplicações práticas dos resultados do trabalho.....	153
5.2.1 Decidindo sobre um sistema de PCP em função de algumas características do ambiente de manufatura	154
5.2.2 Decidindo sobre a melhor composição “alocação de capacidades e sistema de PCP”.....	155
5.3 Limitações do trabalho e trabalhos futuros.....	156
5.4 Considerações finais.....	158
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	159
OBRAS CONSULTADAS	168
GLOSSÁRIO.....	175

LISTA DE FIGURAS**VOLUME I**

FIGURA 1.1: Ilustração do processo de identificação do objetivo da pesquisa	4
FIGURA 1.2: metodologia de pesquisa empregada na elaboração da tese	8
FIGURA 2.1: O Fluxo dos dois Kanbans (baseado em MONDEN 1984)	34
FIGURA 2.2: Controle Kanban. O movimento de peças é mostrado em azul e a circulação de kanbans em verde. As máquinas estão ilustradas como círculos enquanto os triângulos representam os estoques ou <i>buffers</i> . O último <i>buffer</i> é o estoque de produtos acabados (PA)	36
FIGURA 2.3: Controle CONWIP. O movimento de peças é mostrado em azul enquanto que a circulação de autorizações para liberação está em verde	36
FIGURA 2.4: Um sistema de puxar a produção a partir do gargalo. Adaptado de HOOP & SPEARMAN (1996)	42
FIGURA 2.5: O método Tambor-Pulmão-Corda, baseada em SOUZA (1997).	51
FIGURA 2.6: Linha Balanceada. Baseada em CHAKRAVORTY & ATWATER (1996).....	53
FIGURA 2.7: Linha <i>Just in Time</i> . Baseada em CHAKRAVORTY & ATWATER (1996)	53
FIGURA 2.8: Linha Teoria das Restrições. Baseada em CHAKRAVORTY & ATWATER (1996)	54
FIGURA 3.1: Três formatos distintos para a configuração em “V”	60
FIGURA 3.2: Ilustração das oito configurações de alocações de tempos de processamento	63
FIGURA 3.3: Esquema ilustrativo de funcionamento do sistema Kanban adotado. Adaptado de TAYUR (1993).....	66
FIGURA 3.4: Esquema ilustrativo do modelo ROP aplicado na pesquisa.....	72
FIGURA 3.5: Esquema ilustrativo do modelo Kanban aplicado na pesquisa	73
FIGURA 3.6: Esquema ilustrativo do modelo CONWIP aplicado na pesquisa	74
FIGURA 3.7: Esquema ilustrativo do modelo TPC aplicado na pesquisa	75

FIGURA 4.1: Gráfico de desempenho dos sistemas de PCP em uma linha segmentada com $CV=1,0$ e $GD_{(bxo)}$	92
FIGURA 4.2: Gráfico de desempenho dos sistemas de PCP em uma linha segmentada com $CV=1,0$, $GD_{(bxo)}$ e WIP <i>médio</i> medido no seu nível baixo	93
FIGURA 4.3: Gráfico de desempenho dos sistemas de PCP em uma linha segmentada com $CV=1,0$, $GD_{(bxo)}$ e WIP <i>médio</i> medido no seu nível médio	93
FIGURA 4.4: Gráfico de desempenho dos sistemas de PCP em uma linha segmentada com $CV=1,0$, $GD_{(bxo)}$ e WIP <i>médio</i> medido no seu nível alto	94

VOLUME II

FIGURA D1: Gráficos dos métodos de alocação de capacidades no sistema CONWIP para $CV = 1,0$ e GD_{alt}	D-2
FIGURA D2: Gráficos dos métodos de alocação de capacidades no sistema Kanban para $CV = 1,0$ e GD_{alt}	D-3
FIGURA D3: Gráficos dos métodos de alocação de capacidades no sistema <i>Reorder Point</i> para $CV = 1,0$ e GD_{alt}	D-4
FIGURA D4: Gráficos dos métodos de alocação de capacidades no sistema CONWIP para $CV = 1,0$ e GD_{med}	D-5
FIGURA D5: Gráficos dos métodos de alocação de capacidades no sistema Kanban para $CV = 1,0$ e GD_{med}	D-6
FIGURA D6: Gráficos dos métodos de alocação de capacidades no sistema <i>Reorder Point</i> para $CV = 1,0$ e GD_{med}	D-7
FIGURA D7: Gráficos dos métodos de alocação de capacidades no sistema CONWIP para $CV = 1,0$ e GD_{bxo}	D-8
FIGURA D8: Gráficos dos métodos de alocação de capacidades no sistema Kanban para $CV = 1,0$ e GD_{bxo}	D-9
FIGURA D9: Gráficos dos métodos de alocação de capacidades no sistema <i>Reorder Point</i> para $CV = 1,0$ e GD_{bxo}	D-10
FIGURA D10: Gráficos dos métodos de alocação de capacidades no sistema CONWIP para $CV = 0,5$ e GD_{alt}	D-11
FIGURA D11: Gráficos dos métodos de alocação de capacidades no sistema Kanban para $CV = 0,5$ e GD_{alt}	D-12

FIGURA D12: Gráficos dos métodos de alocação de capacidades no sistema <i>Reorder Point</i> para $CV = 0,5$ e GD_{alt}	D-13
FIGURA D13: Gráficos dos métodos de alocação de capacidades no sistema CONWIP para $CV = 0,5$ e GD_{med}	D-14
FIGURA D14: Gráficos dos métodos de alocação de capacidades no sistema Kanban para $CV = 0,5$ e GD_{med}	D-15
FIGURA D15: Gráficos dos métodos de alocação de capacidades no sistema <i>Reorder Point</i> para $CV = 0,5$ e GD_{med}	D-16
FIGURA D16: Gráficos dos métodos de alocação de capacidades no sistema CONWIP para $CV = 0,5$ e GD_{bxxo}	D-17
FIGURA D17: Gráficos dos métodos de alocação de capacidades no sistema Kanban para $CV = 0,5$ e GD_{bxxo}	D-18
FIGURA D18: Gráficos dos métodos de alocação de capacidades no sistema <i>Reorder Point</i> para $CV = 0,5$ e GD_{bxxo}	D-19
FIGURA D19: Gráficos dos métodos de alocação de capacidades no sistema CONWIP para $CV = 0,2$ e GD_{alt}	D-20
FIGURA D20: Gráficos dos métodos de alocação de capacidades no sistema Kanban para $CV = 0,2$ e GD_{alt}	D-21
FIGURA D21: Gráficos dos métodos de alocação de capacidades no sistema <i>Reorder Point</i> para $CV = 0,2$ e GD_{alt}	D-22
FIGURA D22: Gráficos dos métodos de alocação de capacidades no sistema CONWIP para $CV = 0,2$ e GD_{med}	D-23
FIGURA D23: Gráficos dos métodos de alocação de capacidades no sistema Kanban para $CV = 0,2$ e GD_{med}	D-24
FIGURA D24: Gráficos dos métodos de alocação de capacidades no sistema <i>Reorder Point</i> para $CV = 0,2$ e GD_{med}	D-25
FIGURA D25: Gráficos dos métodos de alocação de capacidades no sistema CONWIP para $CV = 0,2$ e GD_{bxxo}	D-26
FIGURA D26: Gráficos dos métodos de alocação de capacidades no sistema Kanban para $CV = 0,2$ e GD_{bxxo}	D-27
FIGURA D27: Gráficos dos métodos de alocação de capacidades no sistema <i>Reorder Point</i> para $CV = 0,2$ e GD_{bxxo}	D-28

FIGURA D28: Gráfico dos sistemas CONWIP, Kanban e ROP numa linha balanceada para CV = 1,0.....	D-29
FIGURA D29: Gráfico dos sistemas CONWIP, Kanban e ROP numa linha balanceada para CV = 0,5.....	D-30
FIGURA D30: Gráfico dos sistemas CONWIP, Kanban e ROP numa linha balanceada para CV = 0,2.....	D-31
FIGURA D31: Gráfico dos sistemas CONWIP, Kanban e ROP numa linha <i>bowI</i> para CV = 1,0 e GD _{alt}	D-32
FIGURA D32: Gráfico dos sistemas CONWIP, Kanban, ROP numa linha <i>bowI</i> para CV = 1,0 e GD _{med}	D-33
FIGURA D33: Gráfico dos sistemas CONWIP, Kanban, ROP numa linha <i>bowI</i> para CV = 1,0 e GD _{bxo}	D-34
FIGURA D34: Gráfico dos sistemas CONWIP, Kanban, ROP numa linha <i>bowI</i> para CV = 0,5 e GD _{alt}	D-35
FIGURA D35: Gráfico dos sistemas CONWIP, Kanban, ROP numa linha <i>bowI</i> para CV = 0,5 e GD _{med}	D-36
FIGURA D36: Gráfico dos sistemas CONWIP, Kanban, ROP numa linha <i>bowI</i> para CV = 0,5 e GD _{bxo}	D-37
FIGURA D37: Gráfico dos sistemas CONWIP, Kanban, ROP numa linha <i>bowI</i> para CV = 0,2 e GD _{alt}	D-38
FIGURA D38: Gráfico dos sistemas CONWIP, Kanban, ROP numa linha <i>bowI</i> para CV = 0,2 e GD _{med}	D-39
FIGURA D39: Gráfico dos sistemas CONWIP, Kanban, ROP numa linha <i>bowI</i> para CV = 0,2 e GD _{bxo}	D-40
FIGURA D40: Gráfico dos sistemas CONWIP, Kanban, ROP numa linha linear decrescente para CV = 1,0 e GD _{alt}	D-41
FIGURA D41: Gráfico dos sistemas CONWIP, Kanban, ROP numa linha linear decrescente para CV = 1,0 e GD _{med}	D-42
FIGURA D42: Gráfico dos sistemas CONWIP, Kanban, ROP numa linha linear decrescente para CV = 1,0 e GD _{bxo}	D-43
FIGURA D43: Gráfico dos sistemas CONWIP, Kanban, ROP numa linha linear decrescente para CV = 0,5 e GD _{alt}	D-44

FIGURA D44: Gráfico dos sistemas CONWIP, Kanban, ROP numa linha linear decrescente para $CV = 0,5$ e GD_{med}	D-45
FIGURA D45: Gráfico dos sistemas CONWIP, Kanban, ROP numa linha linear decrescente para $CV = 0,5$ e GD_{bxo}	D-46
FIGURA D46: Gráfico dos sistemas CONWIP, Kanban, ROP numa linha linear decrescente para $CV = 0,2$ e GD_{alt}	D-47
FIGURA D47: Gráfico dos sistemas CONWIP, Kanban, ROP numa linha linear decrescente para $CV = 0,2$ e GD_{med}	D-48
FIGURA D48: Gráfico dos sistemas CONWIP, Kanban, ROP numa linha linear decrescente para $CV = 0,2$ e GD_{bxo}	D-49
FIGURA D49: Gráfico dos sistemas CONWIP, Kanban, ROP numa linha alternada para $CV = 1,0$ e GD_{alt}	D-50
FIGURA D50: Gráfico dos sistemas CONWIP, Kanban, ROP numa linha alternada para $CV = 1,0$ e GD_{med}	D-51
FIGURA D51: Gráfico dos sistemas CONWIP, Kanban, ROP numa linha alternada para $CV = 1,0$ e GD_{bxo}	D-52
FIGURA D52: Gráfico dos sistemas CONWIP, Kanban, ROP numa linha alternada para $CV = 0,5$ e GD_{alt}	D-53
FIGURA D53: Gráfico dos sistemas CONWIP, Kanban, ROP numa linha alternada para $CV = 0,5$ e GD_{med}	D-54
FIGURA D54: Gráfico dos sistemas CONWIP, Kanban, ROP numa linha alternada para $CV = 0,5$ e GD_{bxo}	D-55
FIGURA D55: Gráfico dos sistemas CONWIP, Kanban, ROP numa linha alternada para $CV = 0,2$ e GD_{alt}	D-56
FIGURA D56: Gráfico dos sistemas CONWIP, Kanban, ROP numa linha alternada para $CV = 0,2$ e GD_{med}	D-57
FIGURA D57: Gráfico dos sistemas CONWIP, Kanban, ROP numa linha alternada para $CV = 0,2$ e GD_{bxo}	D-58
FIGURA D58: Gráfico dos sistemas TPC, CONWIP, Kanban, ROP numa linha linear crescente para $CV = 1,0$ e GD_{alt}	D-59
FIGURA D59: Gráfico dos sistemas TPC, CONWIP, Kanban, ROP numa linha linear crescente para $CV = 1,0$ e GD_{med}	D-60

FIGURA D60: Gráfico dos sistemas TPC, CONWIP, Kanban, ROP numa linha linear crescente para $CV = 1,0$ e GD_{bso}	D-61
FIGURA D61: Gráfico dos sistemas TPC, CONWIP, Kanban, ROP numa linha linear crescente para $CV = 0,5$ e GD_{alt}	D-62
FIGURA D62: Gráfico dos sistemas TPC, CONWIP, Kanban, ROP numa linha linear crescente para $CV = 0,5$ e GD_{med}	D-63
FIGURA D63: Gráfico dos sistemas TPC, CONWIP, Kanban, ROP numa linha linear crescente para $CV = 0,5$ e GD_{bso}	D-64
FIGURA D64: Gráfico dos sistemas TPC, CONWIP, Kanban, ROP numa linha linear crescente para $CV = 0,2$ e GD_{alt}	D-65
FIGURA D65: Gráfico dos sistemas TPC, CONWIP, Kanban, ROP numa linha linear crescente para $CV = 0,2$ e GD_{med}	D-66
FIGURA D66: Gráfico dos sistemas TPC, CONWIP, Kanban, ROP numa linha linear crescente para $CV = 0,2$ e GD_{bso}	D-67
FIGURA D67: Gráfico dos sistemas TPC, CONWIP, Kanban, ROP numa linha segmentada para $CV = 1,0$ e GD_{alt}	D-68
FIGURA D68: Gráfico dos sistemas TPC, CONWIP, Kanban, ROP numa linha segmentada para $CV = 1,0$ e GD_{med}	D-69
FIGURA D69: Gráfico dos sistemas TPC, CONWIP, Kanban, ROP numa linha segmentada para $CV = 1,0$ e GD_{bso}	D-70
FIGURA D70: Gráfico dos sistemas TPC, CONWIP, Kanban, ROP numa linha segmentada para $CV = 0,5$ e GD_{alt}	D-71
FIGURA D71: Gráfico dos sistemas TPC, CONWIP, Kanban, ROP numa linha segmentada para $CV = 0,5$ e GD_{med}	D-72
FIGURA D72: Gráfico dos sistemas TPC, CONWIP, Kanban, ROP numa linha segmentada para $CV = 0,5$ e GD_{bso}	D-73
FIGURA D73: Gráfico dos sistemas TPC, CONWIP, Kanban, ROP numa linha segmentada para $CV = 0,2$ e GD_{alt}	D-74
FIGURA D74: Gráfico dos sistemas TPC, CONWIP, Kanban, ROP numa linha segmentada para $CV = 0,2$ e GD_{med}	D-75
FIGURA D75: Gráfico dos sistemas TPC, CONWIP, Kanban, ROP numa linha segmentada para $CV = 0,2$ e GD_{bso}	D-76

FIGURA D76: Gráfico dos sistemas TPC, CONWIP, Kanban, ROP numa linha <i>step</i> para $CV = 1,0$ e GD_{alt}	D-77
FIGURA D77: Gráfico dos sistemas TPC, CONWIP, Kanban, ROP numa linha <i>step</i> para $CV = 1,0$ e GD_{med}	D-78
FIGURA D78: Gráfico dos sistemas TPC, CONWIP, Kanban, ROP numa linha <i>step</i> para $CV = 1,0$ e GD_{bxxo}	D-79
FIGURA D79: Gráfico dos sistemas TPC, CONWIP, Kanban, ROP numa linha <i>step</i> para $CV = 0,5$ e GD_{alt}	D-80
FIGURA D80: Gráfico dos sistemas TPC, CONWIP, Kanban, ROP numa linha <i>step</i> para $CV = 0,5$ e GD_{med}	D-81
FIGURA D81: Gráfico dos sistemas TPC, CONWIP, Kanban, ROP numa linha <i>step</i> para $CV = 0,5$ e GD_{bxxo}	D-82
FIGURA D82: Gráfico dos sistemas TPC, CONWIP, Kanban, ROP numa linha <i>step</i> para $CV = 0,2$ e GD_{alt}	D-83
FIGURA D83: Gráfico dos sistemas TPC, CONWIP, Kanban, ROP numa linha <i>step</i> para $CV = 0,2$ e GD_{med}	D-84
FIGURA D84: Gráfico dos sistemas TPC, CONWIP, Kanban, ROP numa linha <i>step</i> para $CV = 0,2$ e GD_{bxxo}	D-85
FIGURA D85: Gráfico dos sistemas TPC, CONWIP, Kanban, ROP numa linha em V para $CV = 1,0$ e GD_{alt}	D-86
FIGURA D86: Gráfico dos sistemas TPC, CONWIP, Kanban, ROP numa linha em V para $CV = 1,0$ e GD_{med}	D-87
FIGURA D87: Gráfico dos sistemas TPC, CONWIP, Kanban, ROP numa linha em V para $CV = 1,0$ e GD_{bxxo}	D-88
FIGURA D88: Gráfico dos sistemas TPC, CONWIP, Kanban, ROP numa linha em V para $CV = 0,5$ e GD_{alt}	D-89
FIGURA D89: Gráfico dos sistemas TPC, CONWIP, Kanban, ROP numa linha em V para $CV = 0,5$ e GD_{med}	D-90
FIGURA D90: Gráfico dos sistemas TPC, CONWIP, Kanban, ROP numa linha em V para $CV = 0,5$ e GD_{bxxo}	D-91
FIGURA D91: Gráfico dos sistemas TPC, CONWIP, Kanban, ROP numa linha em V para $CV = 0,2$ e GD_{alt}	D-92

FIGURA D92: Gráfico dos sistemas TPC, CONWIP, Kanban, ROP numa linha em V para $CV = 0,2$ e GD_{med}	D-93
FIGURA D93: Gráfico dos sistemas TPC, CONWIP, Kanban, ROP numa linha em V para $CV = 0,2$ e GD_{bxo}	D-94
FIGURA D94: Gráficos dos métodos de alocação de capacidades no sistema TPC para $CV = 1,0$ e GD_{alt}	D-95
FIGURA D95: Gráficos dos métodos de alocação de capacidades no sistema TPC para $CV = 1,0$ e GD_{med}	D-96
FIGURA D96: Gráficos dos métodos de alocação de capacidades no sistema TPC para $CV = 1,0$ e GD_{bxo}	D-97
FIGURA D97: Gráficos dos métodos de alocação de capacidades no sistema TPC para $CV = 0,5$ e GD_{alt}	D-98
FIGURA D98: Gráficos dos métodos de alocação de capacidades no sistema TPC para $CV = 0,5$ e GD_{med}	D-99
FIGURA D99: Gráficos dos métodos de alocação de capacidades no sistema TPC para $CV = 0,5$ e GD_{bxo}	D-100
FIGURA D100: Gráficos dos métodos de alocação de capacidades no sistema TPC para $CV = 0,2$ e GD_{alt}	D-101
FIGURA D101: Gráficos dos métodos de alocação de capacidades no sistema TPC para $CV = 0,2$ e GD_{med}	D-102
FIGURA D102: Gráficos dos métodos de alocação de capacidades no sistema TPC para $CV = 0,2$ e GD_{bxo}	D-103
FIGURA D103: Gráfico Kanban x CONWIP para $CV = 1,0$ e GD_{alt}	D-104
FIGURA D104: Gráfico Kanban x CONWIP para $CV = 1,0$ e GD_{med}	D-105
FIGURA D105: Gráfico Kanban x CONWIP para $CV = 1,0$ e GD_{bxo}	D-106
FIGURA D106: Gráfico Kanban x CONWIP para $CV = 0,5$ e GD_{alt}	D-107
FIGURA D107: Gráfico Kanban x CONWIP para $CV = 0,5$ e GD_{med}	D-108
FIGURA D108: Gráfico Kanban x CONWIP para $CV = 0,5$ e GD_{bxo}	D-109
FIGURA D109: Gráfico Kanban x CONWIP para $CV = 0,2$ e GD_{alt}	D-110
FIGURA D110: Gráfico Kanban x CONWIP para $CV = 0,2$ e GD_{med}	D-111
FIGURA D111: Gráfico Kanban x CONWIP para $CV = 0,2$ e GD_{bxo}	D-112
FIGURA D112: Gráfico Kanban x TPC para $CV = 1,0$ e GD_{alt}	D-113
FIGURA D113: Gráfico Kanban x TPC para $CV = 1,0$ e GD_{med}	D-114

FIGURA D114: Gráfico Kanban x TPC para $CV = 1,0$ e GD_{bxo}	D-115
FIGURA D115: Gráfico Kanban x TPC para $CV = 0,5$ e GD_{alt}	D-116
FIGURA D116: Gráfico Kanban x TPC para $CV = 0,5$ e GD_{med}	D-117
FIGURA D117: Gráfico Kanban x TPC para $CV = 0,5$ e GD_{bxo}	D-118
FIGURA D118: Gráfico Kanban x TPC para $CV = 0,2$ e GD_{alt}	D-119
FIGURA D119: Gráfico Kanban x TPC para $CV = 0,2$ e GD_{med}	D-120
FIGURA D120: Gráfico Kanban x TPC para $CV = 0,2$ e GD_{bxo}	D-121
FIGURA D121: Gráfico CONWIP x TPC para $CV = 1,0$ e GD_{alt}	D-122
FIGURA D122: Gráfico CONWIP x TPC para $CV = 1,0$ e GD_{med}	D-123
FIGURA D123: Gráfico CONWIP x TPC para $CV = 1,0$ e GD_{bxo}	D-124
FIGURA D124: Gráfico CONWIP x TPC para $CV = 0,5$ e GD_{alt}	D-125
FIGURA D125: Gráfico CONWIP x TPC para $CV = 0,5$ e GD_{med}	D-126
FIGURA D126: Gráfico CONWIP x TPC para $CV = 0,5$ e GD_{bxo}	D-127
FIGURA D127: Gráfico CONWIP x TPC para $CV = 0,2$ e GD_{alt}	D-128
FIGURA D128: Gráfico CONWIP x TPC para $CV = 0,2$ e GD_{med}	D-129
FIGURA D129: Gráfico CONWIP x TPC para $CV = 0,2$ e GD_{bxo}	D-130

LISTA DE TABELAS

VOLUME I

TABELA 2.1: características de aplicabilidade dos sistemas Kanban, CONWIP e TPC	56
TABELA 2.1 (continuação): características de aplicabilidade dos sistemas Kanban, CONWIP e TPC.....	57
TABELA 3.1: Tempos médios de processamento propostos para pesquisa	62
TABELA 3.2: valores encontrados em TAYUR (1993) e nos modelos aqui desenvolvidos para comparação e validação.	78
TABELA 3.3: Dados simulados de uma linha balanceada com cinco recursos, controlada via CONWIP com limite de WIP igual a 25 itens.....	85
TABELA 4.1: dados de desempenho do sistema TPC em uma linha segmentada com CV=1,0 e $GD_{(bso)}$ (ver item 3.3 para legenda dos modelos)	91
TABELA 4.2: dados de desempenho do sistema CONWIP em uma linha segmentada com CV=1,0 e $GD_{(bso)}$ (ver item 3.3 para legenda dos modelos)	91
TABELA 4.3: dados de desempenho do sistema Kanban em uma linha segmentada com CV=1,0 e $GD_{(bso)}$ (ver item 3.3 para legenda dos modelos).....	91
TABELA 4.4: dados de desempenho do sistema ROP em uma linha segmentada com CV=1,0 e $GD_{(bso)}$ (ver item 3.3 para legenda dos modelos).....	91
TABELA 4.5: os melhores critérios de alocação de capacidades para cada PCP segundo o enfoque do nível máximo de WIP	98
TABELA 4.6: tabela de desempenho de sistemas de PCP em linhas balanceadas.....	99
TABELA 4.7: tabela de desempenho de sistemas de PCP em linhas tipo <i>bowI</i> com CV=1,0... 100	
TABELA 4.8: tabela de desempenho de sistemas de PCP em linhas tipo <i>bowI</i> com CV=0,5... 101	
TABELA 4.9: tabela de desempenho de sistemas de PCP em linhas tipo <i>bowI</i> com CV=0,2... 101	
TABELA 4.10: tabela de desempenho de sistemas de PCP em linhas tipo linear crescente com CV=1,0.....	102

TABELA 4.11: tabela de desempenho de sistemas de PCP em linhas tipo linear crescente com CV=0,5.....	103
TABELA 4.12: tabela de desempenho de sistemas de PCP em linhas tipo linear crescente com CV=0,2.....	103
TABELA 4.13: tabela de desempenho de sistemas de PCP em linhas tipo linear decrescente com CV=1,0.....	104
TABELA 4.14: tabela de desempenho de sistemas de PCP em linhas tipo linear decrescente com CV=0,5.....	105
TABELA 4.15: tabela de desempenho de sistemas de PCP em linhas tipo linear decrescente com CV=0,2.....	105
TABELA 4.16: tabela de desempenho de sistemas de PCP em linhas tipo alternada com CV=1,0.....	106
TABELA 4.17: tabela de desempenho de sistemas de PCP em linhas tipo alternada com CV=0,5.....	107
TABELA 4.18: tabela de desempenho de sistemas de PCP em linhas tipo alternada com CV=0,2.....	107
TABELA 4.19: tabela de desempenho de sistemas de PCP em linhas tipo segmentada com CV=1,0.....	108
TABELA 4.20: tabela de desempenho de sistemas de PCP em linhas tipo segmentada com CV=0,5.....	109
TABELA 4.21: tabela de desempenho de sistemas de PCP em linhas tipo segmentada com CV=0,2.....	109
TABELA 4.22: tabela de desempenho de sistemas de PCP em linhas tipo <i>step</i> com CV=1,0..	111
TABELA 4.23: tabela de desempenho de sistemas de PCP em linhas tipo <i>step</i> com CV=0,5..	111
TABELA 4.24: tabela de desempenho de sistemas de PCP em linhas tipo <i>step</i> com CV=0,2..	112
TABELA 4.25: tabela de desempenho de sistemas de PCP em linhas tipo V com CV=1,0.....	113
TABELA 4.26: tabela de desempenho de sistemas de PCP em linhas tipo V com CV=0,5.....	113
TABELA 4.26: tabela de desempenho de sistemas de PCP em linhas tipo V com CV=0,5.....	114
TABELA 4.27: tabela de desempenho de sistemas de PCP em linhas tipo V com CV=0,2.....	114
TABELA 4.28: quadro de desempenho de diversas alocações de capacidades sob o sistema CONWIP com CV = 1,0.....	121
TABELA 4.29: quadro de desempenho de diversas alocações de capacidades sob o sistema CONWIP com CV = 0,5.....	122

TABELA 4.30: quadro de desempenho de diversas alocações de capacidades sob o sistema CONWIP com $CV = 0,2$	122
TABELA 4.31: quadro de desempenho de diversas alocações de capacidades sob o sistema Kanban com $CV = 1,0$	125
TABELA 4.32: quadro de desempenho de diversas alocações de capacidades sob o sistema Kanban com $CV = 0,5$	125
TABELA 4.33: quadro de desempenho de diversas alocações de capacidades sob o sistema Kanban com $CV = 0,2$	126
TABELA 4.34: quadro de desempenho de diversas alocações de capacidades sob o sistema <i>Reorder Point</i> com $CV = 1,0$	129
TABELA 4.35: quadro de desempenho de diversas alocações de capacidades sob o sistema <i>Reorder Point</i> com $CV = 0,5$	129
TABELA 4.36: quadro de desempenho de diversas alocações de capacidades sob o sistema <i>Reorder Point</i> com $CV = 0,2$	130
TABELA 4.37: quadro de desempenho de diversas alocações de capacidades sob o sistema TPC com $CV=1,0$	131
TABELA 4.38: quadro de desempenho de diversas alocações de capacidades sob o sistema TPC com $CV=0,5$	132
TABELA 4.39: quadro de desempenho de diversas alocações de capacidades sob o sistema TPC com $CV=0,2$	132
TABELA 4.40: quadro resumo com as melhores combinações PCP/alocação de capacidades com $CV=1,0$	139
TABELA 4.41: quadro resumo com as melhores combinações PCP/alocação de capacidades com $CV=0,5$	139
TABELA 4.42: quadro resumo com as melhores combinações PCP/alocação de capacidades com $CV=0,2$	140
TABELA 4.43: as melhores alocações PCP/alocação de capacidades sob o enfoque do nível máximo de WIP.....	141
TABELA 5.1: os melhores critérios de alocação de capacidades para cada PCP segundo o enfoque do nível médio de WIP.....	146
TABELA 5.2: quadro resumo de tomada de decisão para sistema de PCP dado certas condições da linha de manufatura e desempenho medido segundo o WIP médio.....	147

TABELA 5.3: quadro resumo de tomada de decisão em projeto de linha com desempenhos medidos segundo o nível médio de WIP.....	155
--	-----

VOLUME II

TABELA B2: Sistema Kanban com $CV=1,0$ e $GD_{(alt)}$	B-3
TABELA B3: Sistema Reorder Point com $CV=1,0$ e $GD_{(alt)}$	B-4
TABELA B4: Sistema CONWIP com $CV=1,0$ e $GD_{(med)}$	B-5
TABELA B5: Sistema Kanban com $CV=1,0$ e $GD_{(med)}$	B-6
TABELA B6: Sistema Reorder Point com $CV=1,0$ e $GD_{(med)}$	B-7
TABELA B7: Sistema CONWIP com $CV=1,0$ e $GD_{(bxo)}$	B-8
TABELA B8: Sistema Kanban com $CV=1,0$ e $GD_{(bxo)}$	B-9
TABELA B9: Sistema Reorder Point com $CV=1,0$ e $GD_{(bxo)}$	B-10
TABELA B10: Sistema CONWIP com $CV=0,50$ e $GD_{(alt)}$	B-11
TABELA B11: Sistema Kanban com $CV=0,5$ e $GD_{(alt)}$	B-12
TABELA B12: Sistema Reorder Point com $CV=0,5$ e $GD_{(alt)}$	B-13
TABELA B13: Sistema CONWIP com $CV=0,5$ e $GD_{(med)}$	B-14
TABELA B14: Sistema Kanban com $CV=0,5$ e $GD_{(med)}$	B-15
TABELA B15: Sistema Reorder Point com $CV=0,5$ e $GD_{(med)}$	B-16
TABELA B16: Sistema CONWIP com $CV=0,5$ e $GD_{(bxo)}$	B-17
TABELA B17: Sistema Kanban com $CV=0,5$ e $GD_{(bxo)}$	B-18
TABELA B18: Sistema Reorder Point com $CV=0,5$ e $GD_{(bxo)}$	B-19
TABELA B19: Sistema CONWIP com $CV=0,2$ e $GD_{(alt)}$	B-20
TABELA B20: Sistema KANBAN com $CV=0,2$ e $GD_{(alt)}$	B-21
TABELA B21: Sistema Reorder Point com $CV=0,2$ e $GD_{(alt)}$	B-22
TABELA B22: Sistema CONWIP com $CV=0,2$ e $GD_{(med)}$	B-23
TABELA B23: Sistema Kanban com $CV=0,2$ e $GD_{(med)}$	B-24
TABELA B24: Sistema Reorder Point com $CV=0,2$ e $GD_{(med)}$	B-25
TABELA B25: Sistema CONWIP com $CV=0,2$ e $GD_{(bxo)}$	B-26
TABELA B26: Sistema Kanban com $CV=0,2$ e $GD_{(bxo)}$	B-27
TABELA B27: Sistema Reorder Point com $CV=0,2$ e $GD_{(bxo)}$	B-28
TABELA B28: desempenho do sistema CONWIP com $CV = 0,2$ (ver item 3.3 para legenda dos modelos).....	B-29

TABELA B29: desempenho do sistema CONWIP com $CV = 0,5$ (ver item 3.3 para legenda dos modelos).....	B-30
TABELA B30: desempenho do sistema CONWIP com $CV = 1,0$ (ver item 3.3 para legenda dos modelos).....	B-31
TABELA B31: desempenho do sistema Kanban com $CV = 0,2$ (ver item 3.3 para legenda dos modelos).....	B-32
TABELA B32: desempenho do sistema Kanban com $CV = 0,5$ (ver item 3.3 para legenda dos modelos).....	B-33
TABELA B33: desempenho do sistema Kanban com $CV = 1,0$ (ver item 3.3 para legenda dos modelos).....	B-34
TABELA B34: desempenho do sistema ROP com $CV = 0,2$ (ver item 3.3 para legenda dos modelos).....	B-35
TABELA B35: desempenho do sistema ROP com $CV = 0,5$ (ver item 3.3 para legenda dos modelos).....	B-36
TABELA B36: desempenho do sistema ROP com $CV = 1,0$ (ver item 3.3 para legenda dos modelos).....	B-37
TABELA B37: Tabela de desempenho de sistemas de PCP combinados com diversos critérios de alocação de capacidades para $CV = 1,0$ e $GD_{(alt)}$	B-38
TABELA B38: Tabela de desempenho de sistemas de PCP combinados com diversos critérios de alocação de capacidades para $CV = 1,0$ e $GD_{(méd)}$	B-39
TABELA B39: Tabela de desempenho de sistemas de PCP combinados com diversos critérios de alocação de capacidades para $CV = 1,0$ e $GD_{(bxo)}$	B-40
TABELA B40: Tabela de desempenho de sistemas de PCP combinados com diversos critérios de alocação de capacidades para $CV = 0,5$ e $GD_{(alt)}$	B-41
TABELA B41: Tabela de desempenho de sistemas de PCP combinados com diversos critérios de alocação de capacidades para $CV = 0,5$ e $GD_{(méd)}$	B-42
TABELA B42: Tabela de desempenho de sistemas de PCP combinados com diversos critérios de alocação de capacidades para $CV = 0,5$ e $GD_{(bxo)}$	B-43
TABELA B43: Tabela de desempenho de sistemas de PCP combinados com diversos critérios de alocação de capacidades para $CV = 0,2$ e $GD_{(alt)}$	B-44
TABELA B44: Tabela de desempenho de sistemas de PCP combinados com diversos critérios de alocação de capacidades para $CV = 0,2$ e $GD_{(méd)}$	B-45

TABELA B45: Tabela de desempenho de sistemas de PCP combinados com diversos critérios de alocação de capacidades para $CV = 0,2$ e $GD_{(bxo)}$	B-46
TABELA B46: resultados referentes às linhas de manufatura com $CV = 1,0$, separados por tipo de critério de alocação de capacidades (ver item 3.3 para legenda dos modelos).....	B-47
TABELA B47: resultados referentes às linhas de manufatura com $CV = 0,5$, separados por tipo de critério de alocação de capacidades (ver item 3.3 para legenda dos modelos).....	B-48
TABELA B48: resultados referentes às linhas de manufatura com $CV = 0,2$, separados por tipo de critério de alocação de capacidades (ver item 3.3 para legenda dos modelos).....	B-49
TABELA C1: Sistema CONWIP com $CV=1,0$ e $GD_{(alt)}$	C-2
TABELA C2: Sistema Kanban com $CV=1,0$ e $GD_{(alt)}$	C-3
TABELA C3: Sistema Reorder Point com $CV=1,0$ e $GD_{(alt)}$	C-4
TABELA C4: Sistema CONWIP com $CV=1,0$ e $GD_{(med)}$	C-5
TABELA C5: Sistema Kanban com $CV=1,0$ e $GD_{(med)}$	C-6
TABELA C6: Sistema Reorder Point com $CV=1,0$ e $GD_{(med)}$	C-7
TABELA C7: Sistema CONWIP com $CV=1,0$ e $GD_{(bxo)}$	C-8
TABELA C8: Sistema Kanban com $CV=1,0$ e $GD_{(bxo)}$	C-9
TABELA C9: Sistema Reorder Point com $CV=1,0$ e $GD_{(bxo)}$	C-10
TABELA C10: Sistema CONWIP com $CV=0,5$ e $GD_{(alt)}$	C-11
TABELA C11: Sistema Kanban com $CV=0,5$ e $GD_{(alt)}$	C-12
TABELA C12: Sistema Reorder Point com $CV=0,5$ e $GD_{(alt)}$	C-13
TABELA C13: Sistema CONWIP com $CV=0,5$ e $GD_{(med)}$	C-14
TABELA C14: Sistema Kanban com $CV=0,5$ e $GD_{(med)}$	C-15
TABELA C15: Sistema Reorder Point com $CV=0,5$ e $GD_{(med)}$	C-16
TABELA C16: Sistema CONWIP com $CV=0,5$ e $GD_{(bxo)}$	C-17
TABELA C17: Sistema Kanban com $CV=0,5$ e $GD_{(bxo)}$	C-18
TABELA C18: Sistema Reorder Point com $CV=0,5$ e $GD_{(bxo)}$	C-19
TABELA C19: Sistema CONWIP com $CV=0,2$ e $GD_{(alt)}$	C-20
TABELA C20: Sistema Kanban com $CV=0,2$ e $GD_{(alt)}$	C-21
TABELA C21: Sistema Reorder Point com $CV=0,2$ e $GD_{(alt)}$	C-22
TABELA C22: Sistema CONWIP com $CV=0,2$ e $GD_{(med)}$	C-23
TABELA C23: Sistema Kanban com $CV=0,2$ e $GD_{(med)}$	C-24
TABELA C24: Sistema Reorder Point com $CV=0,2$ e $GD_{(med)}$	C-25
TABELA C25: Sistema CONWIP com $CV=0,2$ e $GD_{(bxo)}$	C-26

TABELA C26: Sistema Kanban com $CV=0,2$ e $GD_{(bxo)}$	C-27
TABELA C27: Sistema Reorder Point com $CV=0,2$ e $GD_{(bxo)}$	C-28
TABELA C28: Sistema Tambor-Pulmão-Corda com $CV=0,1$ e $GD_{(alt)}$	C-29
TABELA C29: Sistema Tambor-Pulmão-Corda com $CV=1,0$ e $GD_{(med)}$	C-30
TABELA C30: Sistema Tambor-Pulmão-Corda com $CV=0,1$ e $GD_{(bxo)}$	C-31
TABELA C31: Sistema Tambor-Pulmão-Corda com $CV=0,5$ e $GD_{(alt)}$	C-32
TABELA C32: Sistema Tambor-Pulmão-Corda com $CV=0,5$ e $GD_{(med)}$	C-33
TABELA C33: Sistema Tambor-Pulmão-Corda com $CV=0,5$ e $GD_{(bxo)}$	C-34
TABELA C34: Sistema Tambor-Pulmão-Corda com $CV=0,2$ e $GD_{(alt)}$	C-35
TABELA C35: Sistema Tambor-Pulmão-Corda com $CV=0,2$ e $GD_{(med)}$	C-36
TABELA C36: Sistema Tambor-Pulmão-Corda com $CV=0,2$ e $GD_{(bxo)}$	C-37

RESUMO

SOUZA, F.B. (2001). *Um estudo sobre os relacionamentos entre formas de distribuição da capacidade produtiva e sistemas de programação e controle da produção*. São Carlos, 2001. 2v. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

A maioria das pesquisas na área de alocação de capacidades entre recursos de uma linha de manufatura propõe as formas balanceadas e em *bowI* como as mais eficientes para o desempenho da linha como um todo. A maior parte destes estudos é baseada em sistemas simplificados de empurrar a produção, desconsiderando sistemas mais atuais de planejamento e controle da produção (PCP). Por outro lado, estudos referentes à eficiência de sistemas de planejamento e controle da produção não consideram o efeito que critérios distintos de alocação de capacidades podem ter em seus desempenhos. Este trabalho tem como objetivo estudar o relacionamento entre as políticas de alocação de capacidades e os sistemas de PCP. O principal critério de desempenho adotado foi o *throughput*, obtido segundo níveis médios e máximos de estoque em processo em uma linha de produção com cinco recursos. Foram estudados oito tipos de critérios de alocação de capacidades e quatro tipos de sistemas de PCP, segundo três níveis de desbalanceamento de cargas, três níveis de coeficiente de variabilidade dos tempos de processamento dos recursos e cinco níveis máximos de estoque em processo. Foi utilizada uma ferramenta de simulação para criar modelos e simular 1386 cenários distintos. Como resultado, percebeu-se uma estreita interdependência entre políticas de alocação e sistemas de PCP. A pesquisa identificou, ainda, que não há um critério de alocação de capacidades nem um sistema de PCP que se mostre melhor em todas as condições testadas, contrariando diversos estudos sobre o tema.

Palavras-chave: alocação de capacidades, desbalanceamento da produção, fenômeno *bowI*, planejamento e controle de produção.

ABSTRACT

SOUZA, F.B. (2001). *A study on the relationship between types of productive capacity distribution and production planning and control systems*. São Carlos, 2001. 2v. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

Most of the researches on production capacity allocation among resources, proposes the use of balanced and bowl allocation as the most efficient methods in terms of performance. Such studies were generally based on simplified push production systems, not considering other production planning and control systems (PPC). On the other hand, studies about efficiency of PPC systems don't consider the effect of different criteria of capacity allocation on the performance of the PPC systems. The purpose of this research is to investigate how different capacity allocation criteria and different PPC systems interrelate among each other. The major performance criteria used to rank each combination was the resulting throughput, considering several average and maximum levels of work in process (WIP) in a production line with five resources. Eight different types of capacity allocation criteria and four types of PPC systems were studied, with three levels of unbalanced loads, three levels of variability coefficient for processing times and five maximum WIP levels. A simulation tool was used in order to generate the models and run 1386 different scenarios. As a result, it could be noticed a strong interrelationship between the allocation criteria and the PPC systems. The research also showed, on the contrary of many studies on this subject, that for all the combination tested, none of capacity allocation criteria nor PPC systems stood out on the best option.

Keywords: capacities allocation, unbalanced production, bowl phenomenon, production planning and control.

1. INTRODUÇÃO E CONTEXTUALIZAÇÃO

Existe uma percepção quase que generalizada nos meios acadêmicos e empresariais que a melhor maneira de se alocar capacidades produtivas entre recursos fabris de uma linha de manufatura é aquela em que todas as estações de trabalho recebem a mesma quantidade de carga imposta pela demanda de mercado. Ainda que, devido às questões tecnológicas, às diferenças entre produtos manufaturados ou às variabilidades naturais a todo processo produtivo, um perfeito balanceamento de uma linha de produção se torna uma tarefa quase impossível. Apesar disso, a busca por um processo produtivo balanceado tem sido a tônica da maioria dos gerentes de produção e de praticamente todo curso de projeto de fábrica.

Diversos pesquisadores, no entanto, vem estudando novas maneiras de se distribuir capacidade produtiva de forma não balanceada como meio de se melhorar a eficiência de linhas de produção, DAVIS (1966), HILLIER & BOLING (1966), PAYNE *et al.* (1972), EL-RAYAH (1979a), GOLDRATT (1981), SARKER (1984), SMUNT & PERKINS (1985), SO (1989), FRY & RUSSELL (1993), PIKE & MARTIN (1994), CHAKRAVORTY & ATWATER (1996). Seus estudos procuram testar se existe uma maneira ótima de se alocar capacidades produtivas entre recursos de uma linha capaz de aumentar a taxa média de produção desta linha, operá-la com menores níveis de estoque em processo ou melhorar a confiabilidade nos prazos de entrega. Estes trabalhos sugerem que a natureza estocástica dos tempos de processamento dos recursos fabris deixa dúvidas se balancear as linhas de produção é realmente a maneira mais eficaz de projetá-las ou gerenciá-las.

Não parece haver, entretanto, uma boa resposta a este assunto. Pesquisas apoiadas em estudos analíticos matemáticos ou através de experimentos por simulação vem buscando encontrar respostas que possam permitir às empresas operarem suas fábricas com melhores níveis de desempenho, mas estas soluções são muitas vezes contraditórias. Enquanto de um lado existem estudos que demonstram que, sob certas condições, desbalancear deliberadamente as linhas de produção parece ser o melhor caminho (ver por exemplo, HILLIER & BOLING (1966), SO (1989) e ATWATER & CHAKRAVORTY (1994)), outras pesquisas demonstram

que os possíveis ganhos, quando existem, são muito pequenos ou ficam confinados a situações muito específicas (ver por exemplo SMUNT & PERKINS (1985), THOMPSON JUNIOR & BURFORD (1988) e PIKE & MARTIN (1994)).

Excetuando-se quaisquer deficiências provenientes de experimentos mal conduzidos, principalmente aqueles relacionados com o uso da simulação, pode-se dizer que as principais diferenças encontradas nos resultados alcançados se deve às diferentes hipóteses feitas ao problema. Os métodos analíticos matemáticos geralmente impõem modelos simplificados, que possam ser tratados matematicamente, mas que muitas vezes impede generalizações para casos mais realísticos. Por outro lado, a simulação passou a permitir estudos de modelos mais complexos, com maior número de recursos fabris e uso de distribuições estatísticas mais realísticas. No entanto, cada pesquisa parece possuir particularidades próprias, que a distingue de outras com objetivos semelhantes, o que pode também levar a resultados divergentes. Diferentes níveis de variabilidade dos tempos de processamento dos recursos, número de recursos na linha, tipo de configuração de alocação de capacidades produtivas ou nível de estoque permitido entre cada recurso, são alguns dos fatores que podem levar a resultados contraditórios.

Além dos fatores acima citados, acredita-se poder haver outro aspecto, geralmente negligenciado, que pode influenciar sobremaneira no desempenho das diversas alocações de cargas de trabalho: o sistema planejamento e controle da produção (PCP) empregado. As pesquisas anteriormente mencionadas basearam-se, via de regra, em sistemas produtivos convencionais de empurrar a produção com as seguintes características (ver por exemplo, DAVIS (1966), HILLIER & BOLING (1966), PAYNE *et al.* (1972), EL-RAYAH (1979a), SMUNT & PERKINS (1985), THOMPSON JUNIOR & BURFORD (1988), SO (1989) e PIKE & MARTIN (1994)):

- a) o primeiro recurso tem sempre material disponível para trabalhar;
- b) existe uma quantidade pré-fixada (finita ou infinita) de capacidade de armazenagem de materiais entre os recursos;
- c) material é empurrado pela linha de produção até que o último recurso o processe e o libere na forma de produto acabado;
- d) o último recurso nunca fica bloqueado;
- e) a produção de cada recurso pode ser interrompida por dois motivos: falta de material para processar ou bloqueio devido à presença de um pulmão de armazenagem em seu nível máximo a sua frente.

Os sistemas como os anteriormente descritos serão aqui denominados de *Reorder Point*, ou simplesmente ROP.

A pergunta que se faz é quais são os resultados operacionais quando outros métodos de se gerenciar linhas de produção são aplicados a diferentes projetos de linhas de manufatura. Em outras palavras, acredita-se aqui que o desempenho alcançado por uma determinada configuração de linha de produção (em termos de distribuição de cargas) não pode ser dissociado das técnicas de gestão da produção empregadas. Espera-se, portanto, que diferentes configurações de alocação de cargas possam ser preferidas em relação a outras ao se alterar a forma como se controla o fluxo de material da linha de manufatura.

Deixando-se de lado por um momento o foco nas formas de projetar linhas de manufatura, registra-se também outro campo de pesquisa dentro da administração da produção onde a polêmica também parece ter sido uma constância: os sistemas de planejamento e controle da produção (PCP). Novamente, muitos estudiosos têm se debruçado sobre o tema, buscando encontrar uma resposta sobre qual sistema é melhor para situações genéricas ou particulares. Diversas formulações foram desenvolvidas que parecem indicar não haver um tipo de sistema que melhor responda a todas as situações, devendo a escolha ser decidida caso a caso (ver, por exemplo, AGGARWAL (1985), RAMSAY *et al.* (1990), BURBIDGE (1990), SPEARMAN *et al.* (1990), NEWMAN & SRIDHARAN (1992), PTAK (1991), COOK (1994), GSTETTNER & KUHN (1996), MILTENBURG (1997), HUANG & KUSIAK (1998)). Entretanto, um aspecto não tem sido considerado devidamente quando da determinação ou da medição de desempenho de um determinado sistema de PCP: em que tipo de projeto de linha o sistema de PCP foi avaliado? Balanceado ou desbalanceado? Alta ou baixa variabilidade dos tempos de processamento dos recursos? De que maneira os níveis de estoque em processo (*work in process* – WIP) influenciaram no desempenho dos sistemas de PCP? Acredita-se que tais aspectos sejam de alta relevância no desempenho de tais sistemas e que, logo, deveriam ser considerados de maneira especial.

Nota-se, portanto, algo de curioso no que foi dito até aqui. Pesquisas conduzidas sobre projetos “ideais” de linhas de manufatura não consideram, devidamente, a influência que diversas formas de se gerenciar o fluxo de materiais (sistemas de PCP) pode ter no desempenho obtido por determinadas formas de alocação de cargas entre recursos. Por outro lado, estudos referentes aos desempenhos de sistemas de PCP não relacionam devidamente a influência que os vários métodos de alocação de carga, podem ter no desempenho destes sistemas de PCP. Estudar essas duas vias, ou seja, até que ponto os projetos de linhas influenciam no desempenho dos

sistemas de PCP e vice-versa é o foco desta pesquisa. A figura 1.1 a seguir ilustra o raciocínio até aqui desenvolvido.

FIGURA 1.1: Ilustração do processo de identificação do objetivo da pesquisa

A seguir é apresentado o objetivo deste trabalho.

1.1. Objetivo do trabalho

O desempenho de uma linha de manufatura não depende apenas de suas características de projeto, mas também da maneira como esta é planejada, programada e controlada. Por isso, pode-se esperar que a interação “características de projeto” x “sistema de gestão” tenha importante influência no desempenho de uma linha de produção, ou seja, certas características de projeto talvez se adaptem melhor a determinados tipos de sistemas de gestão e vice-versa.

De fato, existem diversos trabalhos relacionados ao tema balanceamento *versus* desbalanceamento de linhas, mas esses não se relacionam com as técnicas de gestão da produção. Também, em estudos referentes aos sistemas de gestão da produção, não se faz a necessária correlação com a forma como se distribui capacidades entre recursos produtivos.

O objetivo desta tese é, portanto, analisar, por meio de simulação, o efeito, na taxa de produção, da interação entre diferentes configurações de alocações de capacidades e diferentes sistemas de PCP.

Para tanto, pretende-se neste trabalho estudar a eficiência de oito configurações de distribuições de capacidades entre recursos segundo quatro métodos de gestão da produção. As oito configurações a serem estudadas procurarão refletir as diversas propostas de projetos de linhas oportunamente discutidas e assim denominadas:

1. Distribuição Balanceada;
2. Distribuição *Bowl*, HILLIER & BOLING (1966);
3. Distribuição Linear Crescente, DAVIS (1966);
4. Distribuição Linear Decrescente, FRY & RUSSELL (1993) e DAVIS (1966);
5. Distribuição Segmentada, FRY & RUSSELL (1993) e GOLDRATT (1981);
6. Distribuição em Passo, FRY & RUSSELL (1993) e WIGHT (1970);
7. Distribuição em “V”, FRY & RUSSELL (1993);
8. Distribuição Alternada, PATTERSON (1964).

Os quatro sistemas de PCP ou métodos de gestão da produção, como já citados anteriormente, que serão aqui abordados são:

1. Sistema *Reorder Point* (ROP)
2. Sistema de controle *Kanban* tradicional
3. Sistema CONWIP
4. Sistema Tambor-Pulmão-Corda (TPC)

Como medida de eficiência das linhas de produção foi selecionada como variável de interesse a taxa média de produção ou *throughput* em função das diversas combinações dos parâmetros mencionados.

Como resultado do trabalho espera-se poder responder às seguintes questões ou hipóteses da pesquisa:

Hipótese 1: os desempenhos dos diversos tipos de configurações de distribuição de capacidades entre recursos de uma linha de manufatura variam significativamente segundo o sistema de gestão de produção empregado.

Hipótese 2: os desempenhos dos diversos tipos de sistemas de gestão da produção variam significativamente segundo o tipo de configuração de distribuição de capacidades entre recursos empregado.

Hipótese 3: existe uma combinação ótima “configuração de distribuição de capacidades” x “sistemas de gestão da produção”, dentro do escopo aqui estudado, que maximize a taxa de produção em quaisquer circunstâncias.

Hipótese 4: existe um sistema de PCP que se sobressai em relação aos demais sob quaisquer critérios de alocação de capacidades.

Hipótese 5: existe um critério de alocação de capacidades que se sobressaia em relação aos demais sob quaisquer sistemas de PCP.

1.2 Metodologia de pesquisa e desenvolvimento do trabalho

A maneira como esta pesquisa foi conduzida pode ser classificada como uma pesquisa básica e quantitativa. Uma vez que o objetivo é identificar os fatores que determinam ou contribuem para a ocorrência do fenômeno em estudo, optou por uma pesquisa explicativa através do método experimental (SILVA, 2001). Procurou-se, para tanto, seguir os seguintes passos (figura 1.2).

Primeiramente, identificou-se o problema da pesquisa, o qual pode ser definido como: “de que maneira os critérios de alocação de capacidades e os sistemas de planejamento e controle da produção estão relacionados segundo uma eficiência medida em termos de *throughput* médio gerado?”

Identificado o problema de pesquisa, formulou-se as diversas hipóteses a serem verificadas, as quais foram anteriormente apresentadas. Como forma de testar as hipóteses e responder ao problema identificado, optou-se por executar uma extensa revisão bibliográfica (capítulo 2) sobre os dois campos de conhecimento básicos para esta pesquisa: a) os critérios de alocação de capacidades e; b) os sistemas de planejamento e controle de produção selecionados.

Um estudo comparativo foi então conduzido. Dentro deste, planejou-se a execução do mesmo a partir da definição das diversas variáveis envolvidas, as quais definem o domínio de aplicação da pesquisa e o modelo de ambiente produtivo. As variáveis consideradas foram:

- a) tipo de arranjo dos recursos;
- b) número de recursos;
- c) tempos médios de processamento destes recursos (os quais definem os oito critérios de alocação de capacidades e seus respectivos níveis de desbalanceamento);
- d) coeficientes de variabilidades dos tempos de processamento dos recursos (ver definição de coeficiente de variabilidades no capítulo 3, item 3.2);
- e) níveis de estoques permitidos na linha de produção e;
- f) critérios para autorização e bloqueios de produção (os quais, por sua vez, determinam os quatro sistemas de PCP estudados).

Dada as restrições impostas pelas variáveis selecionadas, optou-se pela escolha da simulação como método de comparação dos modelos. Uma ferramenta de simulação adequada foi então selecionada. No capítulo 3, item 3.5, é discutida esta questão.

Definida a simulação como método de pesquisa, foram desenvolvidos os modelos segundo às características da ferramenta de simulação. Em seguida à criação e validação dos modelos combinando todas as variáveis já mencionadas, os experimentos de simulação foram planejados segundo o método *batch means* (ver capítulo 3, item 3.7). Neste momento, determinou-se também qual a melhor estratégia para análise e comparação dos resultados, a qual a constatou ser necessário medir o *throughput* em função de duas formas de estoque em processo (WIP): WIP máximo permitido na linha e WIP médio observado (ver capítulo 3). Foram então executadas as simulações e coletados os dados para a análise e comparação dos resultados.

Depois de gerados os resultados e realizados os estudos comparativos, foram obtidas novas conclusões sobre o tema pesquisado e respondidas as hipóteses primeiramente formuladas. As conclusões foram então correlacionadas com os conceitos e teorias presentes na literatura. Finalmente, uma discussão sobre as possíveis oportunidades para continuidade da pesquisa foi identificada.

FIGURA 1.2: metodologia de pesquisa empregada na elaboração da tese

1.3 Estrutura do texto

A seguir, no capítulo 2, é apresentada a revisão bibliográfica deste trabalho, em cujos tópicos se abordará as técnicas de alocação de capacidades e três dos sistemas de PCP seleccionados para a pesquisa: sistemas Kanban, CONWIP e TPC.

O capítulo 3 discute as condições em que a pesquisa foi realizada, definindo-se o domínio de aplicação, os parâmetros do modelo, os métodos estatísticos empregados aos modelos e o planeamento de experimentos.

No capítulo 4 são apresentadas as observações coletadas a partir dos resultados da simulação. Neste capítulo, as observações são divididas em duas partes. A primeira aborda o desempenho das linhas de manufatura tendo como foco o nível **máximo** de WIP permitido. A segunda parte aborda o desempenho das mesmas linhas tendo como foco o nível **médio** de WIP medido na linha.

No capítulo 5 são apresentadas as conclusões gerais do trabalho, respondendo às questões ou hipóteses apresentadas no primeiro capítulo. São também discutidas as possíveis aplicações dos resultados alcançados na pesquisa.. Propostas de continuidade desta tese são também apresentadas neste capítulo na forma de trabalhos futuros.

Por fim, no final da tese encontram-se alguns anexos. O anexo A exemplifica quatro programas de simulação, cada qual representando um sistema de PCP, elaborados segundo o software GPSS/H. Os anexos B, C, D apresentam as tabelas e os gráficos construídos com os dados gerados a partir dos experimentos de simulação.

Para uma melhor compreensão das idéias utilizadas ao longo de todo este trabalho, evitando confusões de conceitos quando terminologias distintas são utilizadas para significados semelhantes, sugere-se a leitura do glossário no fim deste trabalho.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo tem como objetivo elaborar um levantamento bibliográfico sobre os principais assuntos relacionados ao desenvolvimento do trabalho. Para tal, dois tópicos principais serão abordados em seqüência. O primeiro tratará dos métodos de alocação de capacidades entre recursos, enfocando aqueles selecionados para esta pesquisa. O segundo abordará os sistemas de planejamento e controle de produção, com ênfase nos sistemas Kanban, CONWIP e Tambor-Pulmão-Corda.

2.1 Os métodos de alocação de capacidades entre recursos de manufatura

A busca pela eficiência dos recursos produtivos como forma de maximizar o rendimento operacional tem sido uma constante e uma norma para a maioria das empresas de manufatura. No entanto, um número cada vez maior de pesquisas vem alertando que a busca por altos níveis de utilização dos recursos pode trazer impactos negativos em outras importantes medidas de desempenho como: baixo *lead time*, menores níveis de estoques em processo e confiabilidade no atendimento dos prazos de pedidos (HOPP & SPEARMAN, 1996).

Uma forma de se reduzir os níveis de utilização, melhorando o desempenho das medidas a pouco citadas, sem comprometer o volume de produção (*throughput*) planejado é aumentando a capacidade de produção de alguns recursos, aceitando que estes operem com algum nível de ociosidade (STEELE & PARKE-SHIELDS, 1993; ATWATER & CHAKRAVORTY, 1994).

Entretanto, é prática comum nas empresas de manufatura a busca constante pelo balanceamento das capacidades produtivas dos recursos da empresa, ou seja, procura-se alcançar uma situação onde a capacidade de todos os recursos esteja aproximadamente equilibrada entre si e com a demanda de mercado. Tal prática é justificada pela tentativa de se manter todos os recursos continuamente ativados, amortizando os investimentos realizados e procurando estabelecer um fluxo uniforme de materiais pela fábrica. Desta forma, evitar-se-ia que a empresa perdesse vendas por falta de capacidade de seus recursos ou, no caso de haver excesso de capacidade, que essa operasse com baixas eficiências. Essa última situação é vista como uma

ótima oportunidade de redução de custos a partir da venda deste excesso de capacidade (CORBETT NETO, 1996).

Para SARKER & HARRIS (1988), uma linha de produção deve ser, idealmente, perfeitamente balanceada, ou seja, os tempos de processamento nos diferentes estágios devem ser os mesmos. Nesta situação, os operadores nos diferentes estágios ou recursos não experimentariam nenhum tipo de bloqueio ou problemas de abastecimento para qualquer produto, tanto em sistemas que empurram quanto àqueles que puxam a produção. Em uma situação real, no entanto, obter tempos de processamento nos diferentes estágios de forma a se conseguir uma linha de produção perfeitamente balanceada é praticamente impossível devido aos desiguais tempos de processamento e/ou restrições tecnológicas.

Ainda segundo estes autores, as desigualdades nos tempos de processo dos recursos resultarão na formação ou diminuição de filas (dependendo do tempo de tarefa da estação adjacente), aumento ou diminuição da utilização dos recursos, flutuações nas taxas de produção, etc. Desta forma, o conhecimento prévio dos conseqüentes resultados de diferentes configurações de linhas de produção desbalanceadas poderia ajudar a gerência a controlar a produção de um modo mais eficiente.

2.1.1 O fenômeno *bowl*

O primeiro trabalho de pesquisa publicado referente ao “fenômeno *bowl*” foi o artigo de HILLIER & BOLING (1966). Na pesquisa os autores verificaram que o número de estações de trabalho, seus tempos de processamento e a capacidade de estocagem entre essas estações são fatores de projeto críticos que influenciam fortemente a eficiência do sistema.

Segundo os autores, em sistemas constituídos por duas estações de trabalho, a taxa de produção é maximizada quando se consegue balancear perfeitamente a linha de produção. Entretanto, a alocação desigual de cargas em uma forma apropriada rende uma taxa de produção mais alta em um sistema com três estações, com ou sem estoques, do que em uma linha de produção perfeitamente balanceada. Foi encontrado que a taxa de produção para sistemas com três estações é maximizada alocando-se menos tempo de processamento médio na estação intermediária em comparação com as estações localizadas no extremo da linha. A isto os autores chamaram de fenômeno *bowl*, onde a taxa de produção é maximizada designando-se menores tempos de processamento médio às estações intermediárias em relação às estações localizadas nas duas pontas da linha. Tal constatação foi verificada para sistemas de linhas de produção com

três ou mais estações. As pesquisas foram desenvolvidas aplicando-se a cada recurso um tempo de processamento variável com distribuição exponencial para representá-lo.

Uma possível explicação para este fenômeno, de acordo com os autores, estaria no fato que as estações centrais seriam as mais críticas, pois estas afetariam tanto os recursos precedentes quanto os subseqüentes a ela, ou seja, melhores benefícios poderiam ser obtidos aumentando a velocidade destas estações. Da mesma forma, o fenômeno *bowl* tende a tornar-se menos pronunciado quando a quantidade permitida de estoque em processo é aumentada, uma vez que isto tornaria todas as estações menos dependentes umas das outras.

Em resumo, os autores concluem que, em muitos casos, desbalancear uma linha de produção com tempos de operação variáveis podem aumentar sua eficiência e que o fenômeno *bowl* caracteriza a forma geral na qual uma linha de produção deveria ser desbalanceada.

Treze anos depois, HILLIER & BOLING (1979) complementam seus estudos anteriores, agora pesquisando casos mais gerais com distribuição Erlang. Neste trabalho, os autores concluem que há muita robustez na solução encontrada (fenômeno *bowl*), pois quando se muda uma linha balanceada na direção indicada pelo fenômeno *bowl*, a taxa média de produção se aproxima do máximo. Por outro lado, se a linha é desbalanceada em uma direção substancialmente diferente, a taxa de produção média decresce muito rapidamente.

Seus resultados ainda indicam que quando o número de estações na linha de produção aumenta, a quantidade média de desbalanceamento em alocações ótimas permanece aproximadamente a mesma, mas o aumento na taxa de produção média obtida com a alocação ótima é muito superior à obtida com a linha balanceada. Se os tempos operacionais são muito variáveis (distribuição exponencial), o efeito de se aumentar o espaço para estoque em processo vai na direção de se diminuir o nível médio de desbalanceamento na alocação ótima, mas somente levemente diminui as melhorias resultantes sobre a linha balanceada. Por outro lado, se a quantidade de espaço de estocagem é muito pequeno, o efeito de diminuir a variabilidade dos tempos de operação é de diminuir estes mesmos níveis de desbalanceamentos, mas a uma taxa “surpreendentemente” menor. Ao contrário, o efeito de, simultaneamente, se aumentar o espaço de estocagem e diminuir a variabilidade dos tempos operacionais é de, rapidamente, tanto diminuir a quantidade de desbalanceamento ótimo quanto a melhoria resultante.

Por fim os autores sugerem que, apesar de ser realmente impossível atingir-se a alocação ótima ao se designar cargas aos recursos produtivos em uma linha real, os resultados obtidos devem servir de guia na escolha da direção que o desbalanceamento deve ser alcançado.

Em outro estudo complementar, HILLIER & SO (1993) pesquisaram os efeitos da aplicação do fenômeno *bowling* em linhas de produção com um número mais elevado de estações de trabalho que o realizado em pesquisas anteriores. Com os avanços computacionais permitidos na época, estes autores se propuseram a encontrar resultados exatos sobre a alocação ótima em casos mais amplos que os pesquisados em HILLIER & BOLING (1979).

Segundo HILLIER & SO (1993), a alocação ótima de trabalho sob o fenômeno *bowling* é um objetivo que não pode ser alcançado de maneira exata na prática, devido à impossibilidade de se designar tempos de processamento aos recursos com a devida precisão. No entanto, os autores argumentam que as mesmas dificuldades são encontradas quando o objetivo passa a ser a busca por um balanceamento perfeito. Assim, seria preferível buscar o objetivo correto, correspondente à alocação ótima de trabalho dada pelo fenômeno *bowling*. Os autores lembram que desbalanceamentos na direção errada podem causar grandes reduções no *throughput*.

Um dos pontos mais discutidos em relação ao fenômeno *bowling* refere-se a sua robustez, isto é, quão eficiente é uma linha de produção projetada tendo o fenômeno *bowling* como alvo, mas que, devido a alguns fatores, a alocação de cargas se desviou do projetado? Diversos críticos do uso prático da distribuição *bowling*, como SMUNT & PERKINS (1985, 1989 e 1990), afirmam que, embora o fenômeno *bowling* apresente, sob o ponto de vista teórico, alguma vantagem sobre as linhas balanceadas em algumas situações específicas, atingir a alocação ótima para a distribuição *bowling* seria impossível do ponto de vista prático, tornando-a apenas uma curiosidade científico-acadêmica.

Atingir um ganho completo no *throughput* a partir do fenômeno *bowling* depende de se identificar corretamente a quantidade ótima de desbalanceamento e designar cargas de trabalho de acordo. A determinação do nível ótimo de desbalanceamento de uma linha requer uma acurada identificação dos parâmetros do sistema, incluindo principalmente os coeficientes de variação dos tempos de processamento. O grau de desbalanceamento em uma alocação ótima de trabalho aumenta com o aumento do coeficiente de variação. Logo, um erro ao se estimar o coeficiente de variação pode causar um substancial erro de estimativa da alocação ótima. Estudar quanto se perde em *throughput* ao se alocar cargas tendo o fenômeno *bowling* como alvo, mas alocando valores até certo ponto distantes deste alvo, foi o objetivo da pesquisa de PIKE & MARTIN (1994) e HILLIER & SO (1996).

PIKE & MARTIN (1994) efetuaram pesquisa com o intuito de testar até que ponto as maiores críticas geralmente dirigidas ao fenômeno *bowling* são realmente válidas. Tais críticas seriam, basicamente, que o fenômeno *bowling* existe apenas para situações caracterizadas por um

reduzido número de recursos, estoques em processos limitados a valores pequenos e alta variabilidade dos tempos de processamento.

Os autores simularam então diversas situações, variando os parâmetros relativos à capacidade de estocagem entre recursos, ao número de recursos na linha, ao coeficiente de variabilidade dos tempos de processamento e ainda ao tipo de distribuição estatística empregada. Os resultados mostrados em PIKE & MARTIN (1994) sustentam que, embora o arranjo *bowI* “ótimo” possa ser difícil de se atingir, existe um elevado número de arranjos tipo *bowI*, com variações de capacidade para ambos os lados (para acima ou para abaixo) em torno da configuração ótima, cujo desempenho se iguala ou mesmo supera o desempenho de uma linha balanceada. Isto implicaria que, apesar do arranjo *bowI* ótimo seja inatingível, a linha deveria ser desbalanceada nesta direção. Dado que se implementar uma linha perfeitamente balanceada é igualmente muito difícil, se não impossível, todos os esforços deveriam ser direcionados para se assegurar que a linha tenha, ao menos, alguma configuração *bowI* aceitável.

Com finalidades até certo ponto semelhantes ao trabalho de PIKE & MARTIN (1994), porém com algumas conclusões talvez ainda mais sólidas, HILLIER & SO (1996) desenvolveram pesquisa cujo objetivo primeiro era de responder a três perguntas principais:

1. Qual o efeito de estimativas imprecisas sobre a alocação ótima;
2. Como minimizar este efeito e;
3. Como o *throughput* da alocação de trabalho resultante se compara com aquela da alocação balanceada.

Como conclusões, os autores observaram que a alocação *bowI* ótima é relativamente robusta quando há imprecisões nas estimativas dos coeficientes de variação dos tempos de processamento para se determinar as quantidades ótimas de desbalanceamento. Os resultados numéricos demonstraram que mesmo grandes erros na ^{víte} quantidade de desbalanceamento ainda permitem que se alcance a maioria dos benefícios potenciais de melhoria no *throughput* em relação às linhas balanceadas. Em outras palavras, mesmo alocações distantes da ótima, tendo a distribuição *bowI* como meta, rendem um desempenho superior às linhas perfeitamente balanceadas. AP 48 DES.

Se, por um lado, é difícil a obtenção de uma alocação tipo *bowI* ótima, as mesmas dificuldades e pelas mesmas razões, dificultam também a factibilidade de obtenção de uma linha perfeitamente balanceada. Ambos os critérios de alocação de cargas devem, portanto, ser vistos como objetivos a serem alcançados. HILLIER & SO (1996) realizaram então um estudo para verificar qual destes critérios de alocação fornece um melhor alvo.

Os resultados numéricos sugerem que o uso da alocação *bowI* como meta permite que, mesmo com desvios de até 10% em torno do valor ótimo, se obtenha desempenhos superiores em termos de *throughput* em relação às linhas balanceadas. Foi também comparada a alocação *bowI* ótima com a balanceada como objetivos ao se designar trabalhos aos recursos. Observou-se que desvios em torno de uma alocação *bowI* ótima trazem menos perdas ao *throughput* quando comparado a iguais desvios em torno de uma linha perfeitamente balanceada. Em outras palavras, a alocação balanceada como alvo possui maior risco em relação à alocação *bowI*, ou seja, a alocação *bowI* é mais robusta segundo os autores.

Outros estudos procuraram testar o método *bowI* sob outras condições ou hipóteses, com o objetivo de se encontrar possíveis limitações ou novas potencialidades do método. As primeiras pesquisas referentes ao fenômeno *bowI* estavam calcadas na hipótese que os tempos de processamento seguem distribuições exponenciais ou Erlang dos tempos de processamento e com um pequeno número de recursos na linha.

SO (1989) estudou o efeito de se desbalancear uma linha de produção sob a hipótese que a geração dos tempos de processamento são normalmente distribuídos. Ele conclui que há melhoria na eficiência da linha de produção com capacidade limitada de estocagem quando a linha é apropriadamente desbalanceada. Para o autor, desbalancear o trabalho entre as estações de uma linha de produção pode resultar em uma melhoria na eficiência da linha, mesmo quando a variância de cada tempo de processamento é pequena. Entretanto, é muito importante desbalancear o trabalho na forma apropriada (formato *bowI*), pois caso contrário os resultados levariam a uma diminuição da eficiência da linha. O estudo também sugere que o projeto de linhas perfeitamente balanceadas poderia gerar desempenhos perto do valor ótimo quando a variabilidade nos tempos de processamento é baixa.

Em outro estudo, THOMPSON JUNIOR & BURFORD (1988) é menos otimista com os resultados referentes ao fenômeno *bowI*. Os autores testaram desbalancear linhas de produção não apenas com relação à localização de recursos com tempos *médios* de processamento diferentes dos demais na linha, mas também com relação à localização de recursos com *variabilidades* de seus tempos médios diferentes dos demais recursos. Suas pesquisas concluíram que para sistemas com três e cinco estações, tempos de processamento normalmente distribuídos e nenhum estoque permitido, existe um estatisticamente significativo efeito *bowI* com respeito à localização da variação dentro da série de operações que compreendem o sistema. Isto quer dizer que a estação com a menor variação do tempo de processamento deve ser localizada no meio da linha. Eles observaram, por outro lado, que nenhuma melhoria no fluxo do

sistema foi obtida posicionando no meio da linha o menor tempo de operação médio. Caso se permita, no entanto, um nível razoável de estoque em processo no sistema, os autores verificaram que os efeitos proporcionados pelo fenômeno *bowl* desaparecem inclusive com relação à localização de recursos com menor variabilidade no meio da linha. Assim, estes concluíram que enquanto o fenômeno *bowl* é uma curiosidade interessante, este tem pouco significado prático.

Existem ainda muitos outros trabalhos referentes ao fenômeno *bowl*, principalmente relacionados ao estudo de outras formas de distribuição estatística dos tempos de operação, como o trabalho de MISHRA et al. (1985) que estudaram o efeito combinado de mais de um tipo de distribuição estatística (hiperexponencial).

SMUNT & PERKINS (1985) realizaram um importante trabalho sobre projeto de linhas de manufatura considerando, simultaneamente, diversos fatores que podem influenciar o desempenho de uma linha de manufatura em termos de taxa de produção, como alocação de tempos médios de processamento entre os recursos, alocação de capacidades de estocagem entre os recursos, número de recursos fabris e grau de variabilidade dos recursos. Através de uma ampla revisão sobre o tema, os autores mostram que, pelo menos até aquele momento, cinco conclusões podiam ser extraídas:

- 1) A alocação desbalanceada dos tempos de processamento é ótima quando o coeficiente de variação destes tempos de processamento é grande;
- 2) A alocação desbalanceada de capacidades de estocagem entre recursos melhora a taxa de produção da linha quando a variação dos tempos de produção é grande;
- 3) A taxa de produção de uma linha de manufatura (tipo *unpaced*, ou seja, conduzida sem o auxílio de uma conexão física entre os recursos) decresce conforme o número de recursos fabris aumenta;
- 4) A taxa de produção de uma linha aumenta conforme se aumenta a capacidade de estocagem dos recursos e;
- 5) A taxa de produção de uma linha decresce conforme se aumenta a variação dos tempos de processamento.

Com o objetivo de testar a validade das hipóteses ou afirmações anteriores, os autores conduziram uma ampla experimentação baseada na simulação, onde o efeito *bowl* foi estudado segundo a variação de duas condições: variância dos tempos de processamento e capacidade de estocagem dos recursos. Os tempos de processamento dos recursos variavam segundo uma distribuição normal truncada (para se evitar valores negativos), os quais os autores consideravam

mais adequados para representar as verdadeiras variações nos tempos de processamento de recursos reais.

As seguintes conclusões foram encontradas pelos autores;

- 1) O uso da distribuição *bowl* para alocação dos tempos de processamento não aumenta significativamente (e geralmente decresce) a taxa de produção quando a variância é baixa ou moderada;
- 2) Qualquer benefício em se usar a distribuição *bowl* é rapidamente dissipado quando a capacidade de armazenamento dos recursos é grande e a variância é baixa ou moderada;

Os resultados de SMUNT et al. (1985) mostraram que o uso do fenômeno *bowl* deve ficar restrito a situações altamente específicas. De fato, os resultados sugerem que o uso do fenômeno *bowl* deve ser considerado por um gerente de produção apenas se os tempos de processamento exibirem altas variâncias, devendo as linhas ser balanceadas quando os seus recursos possuírem tempos de processamento normalmente distribuídos e com baixas ou moderadas variâncias. As constatações de SMUNT & PERKINS (1985), portanto, diferem daquelas posteriormente encontradas por SO (1989).

Em SMUNT & PERKINS (1990), os autores fazem uma análise crítica da forma como SO (1989) interpretou seus resultados em seu estudo. Para SMUNT & PERKINS (1990), o fenômeno *bowl* realmente existe para situações onde a capacidade de estocagem é baixa e o coeficiente de variação é alto. SMUNT & PERKINS (1990) concordam com a afirmação de SO (1989) que diz que o fenômeno *bowl* existe para uma ampla variedade de capacidades de estocagem e coeficientes de variação, desde que a distribuição *bowl* seja cuidadosamente escolhida. Porém discordam das implicações que SO (1989) faz sobre o tema.

Em resposta, SO (1990) questiona os argumentos apresentados, afirmando que os experimentos executados em SMUNT & PERKINS (1985) foram baseados em distribuições *bowl* não ótimas para a situação em estudo. Uma vez que as ótimas distribuições *bowl* dependem de diversos fatores como comprimento da linha, capacidade de estocagem e variabilidade dos tempos de processamento, não há uma única forma de alocação de capacidades que funcionará bem sob uma ampla gama de condições. Desta forma, seria de se esperar que os resultados de SMUNT & PERKINS (1985) não favorecessem as alocações tipo *bowl*. Para SO (1990), então, os resultados encontrados em SMUNT & PERKINS (1985) não implicam que o fenômeno *bowl* não exista quando a variabilidade é baixa ou a linha é longa.

SO (1990) insiste que, apesar das melhorias obtidas sob condições de baixa variabilidade serem pequenas, elas existem e que mesmo um por cento de melhoria poderia, eventualmente, proporcionar amplas economias. Na prática, segundo o autor, a busca por uma linha perfeitamente balanceada é geralmente tão difícil quanto procurar por uma outra forma de alocação. Portanto, por que buscar por uma estratégia sub-ótima que é igualmente tão difícil de alcançar quanto uma estratégia ótima? E complementa, dizendo que nenhuma única alocação de capacidades será a melhor para todas as condições, devendo se considerar tanto as aplicações quanto os ambientes na seleção da melhor distribuição de cargas de trabalho em linhas de produção.

O trabalho de SMUNT & PERKINS (1985) também foi pivô de uma outra discussão acadêmica a respeito da eficiência ou não do fenômeno *bowling*. Desta vez as críticas vieram de KARWAN & PHILIPOOM (1989), os quais contestaram os resultados da pesquisa relatada em SMUNT & PERKINS (1985). Basicamente, KARWAN & PHILIPOOM (1989) argumentam que as principais falhas presentes em SMUNT & PERKINS (1985) são as seguintes:

- o experimento de simulação falha em não utilizar sementes comuns na geração de números aleatórios;
- o número de observações coletadas (oito) é muito pequeno;
- foi usada a distribuição normal regular ao invés da distribuição normal inclinada;
- e o mais importante, para representação do fenômeno *bowling*, foi usado um grupo predeterminado e arbitrário de tempos de processamento, antes que a alocação ótima.

Em resposta ao trabalho de KARWAN & PHILIPOOM (1989), SMUNT & PERKINS (1989) refizeram os experimentos, aumentando o número de observações por corrida de simulação. Os resultados obtidos confirmam e ressaltam os resultados obtidos em 1985. Segundo os autores, o fenômeno *bowling* de fato existe em situações com baixos níveis de estoques e alto coeficiente de variabilidade dos tempos de processamento. Entretanto, em cenários mais realísticos, com níveis de estoques mais altos ou coeficientes de variação mais baixos, o fenômeno *bowling* deixa de ser uma consideração importante em projetos de linhas. Neste caso, salientam os autores, tais conclusões independem do fato da alocação *bowling* considerada ser arbitrária ou ótima. Como conclusão, os autores finalizam afirmando que o fenômeno *bowling*, ainda que real, não é robusto sob condições operacionais típicas.

2.1.2 Outros estudos sobre desbalanceamento de linhas de produção

O fenômeno *bowl* não pode, ao menos atualmente, ser considerado a melhor forma de se alocar cargas em elementos produtivos de uma linha. Além da eficiência do fenômeno *bowl* ter sido contestada em vários trabalhos, existem também na literatura, como já mencionado anteriormente, outras propostas de distribuição de capacidades de produção.

PATTERSON (1964), por exemplo, usou o processo de Markov para analisar o fluxo de tarefas através de uma linha de montagem com N estações e com tempos de processamento exponencialmente distribuídos. Ele desenvolveu um método para computar a taxa de produção da linha dado um determinado arranjo de recursos no sistema. Ainda que o autor não tenha sido capaz de determinar qual o arranjo ótimo de recursos, ele especulou que recursos rápidos (pequenos tempos médios de processamento) e lentos (altos tempos médios de processamento) devem ser intercalados para que se minimize os efeitos de bloqueio dentro do sistema.

Outra proposta para desbalanceamento de linha foi feita por DAVIS (1966), que simulou algumas combinações de tempos de processamento em uma linha de manufatura com três recursos. Além de mostrar que linhas movidas de maneira livre (*unpaced*) são superiores a aquelas controladas fisicamente (*paced*), como numa esteira, por exemplo, o autor combinou três tipos de velocidades de recursos (rápidos, médios e lentos) para verificar qual delas possibilita o melhor desempenho. Com tempos de processamento normal e tipo normal inclinada (Tipo III de Pearson), parece haver algum ganho quando se tem uma linha desbalanceada com o primeiro recurso tendo o menor tempo médio de processamento (recurso rápido) e o último recurso tendo o maior tempo médio de processamento (recurso lento). Seu estudo também mostrou que conforme o coeficiente de variação aumentava, a taxa de saída de produtos da linha diminuía.

PAYNE *et al.* (1972) também fizeram uma importante contribuição para o entendimento dos fundamentos de uma linha de produção, confirmando, particularmente, alguns resultados obtidos em DAVIS (1966). Em seus estudos, PAYNE *et al.* (1972) observaram que a maioria das pesquisas sobre projetos de linhas de manufatura, ao menos até aquele momento, objetivava primeiramente lidar com as características operacionais da linha como um todo, negligenciando, muitas vezes, importantes aspectos relacionados aos desempenhos individuais das estações de trabalho de tais linhas. Para eles, pouco se conhecia sobre a distribuição dos tempos de ociosidade ou estoque em processo entre estações de uma linha de produção, ainda que, para os autores, tais aspectos são de clara importância para projetos de linhas.

Com a finalidade de efetuar uma pesquisa neste tema, os autores construíram modelos para simulação, constituídos de 20 recursos em linha, com capacidade de estocagem infinita

entre cada par de recursos e tempos de processamento gerados segundo uma distribuição normal. O primeiro recurso nunca para por falta de material e uma linha foi considerada balanceada quando todos os recursos ou estações de trabalho tenham o mesmo tempo médio de processamento. O objetivo é investigar os tempos ociosos em cada recurso e a máxima fila ou estoque antes de cada recurso para várias distribuições de tempos de trabalho sob um período de tempo especificado.

Resultados mostraram que, mesmo em linhas perfeitamente balanceadas, os níveis de ociosidade tendem a aumentar no sentido do fluxo de materiais, ou seja, quanto mais no final da linha está um recurso, maior é o nível de ociosidade por ele apresentado. Tal situação, segundo os autores, é devida ao fato que cada recurso é dependente dos recursos que o sucedem, logo, quanto maior o número de recursos predecessores, maior a probabilidade de este recurso ficar sem material para processar. Além disso, como o fornecimento de trabalho é também dependente da variabilidade dos tempos de processamento associados, o aumento na variabilidade leva a um aumento de ociosidade de cada recurso da linha e uma conseqüente redução na taxa de produção. Foi verificado também que as maiores filas (ou estoques em processo) ocorrem mais no início da linha, sendo que esta diferença, assim como o tamanho da fila máxima, tende a aumentar conforme se aumenta a variabilidade dos tempos de processamento.

Com estas informações em mãos, os autores reformularam os modelos e propuseram algumas novas configurações. Já que os níveis de ociosidade tendem a aumentar em direção ao final da linha, novos modelos foram construídos sendo que os tempos médios de processamento para cada estação aumentavam na direção do fluxo de produção. Outra possível forma de se obter resultados semelhantes poderia ser a de alocar aos recursos uma taxa crescente de variabilidade dos tempos de processamentos, ou seja, aos recursos localizados mais próximos do final da linha, maiores seriam seus níveis de variabilidade associados. Também foram testados critérios de alocação de tempos médios de processamento e de variabilidade opostos aos citados.

Nestas situações, foi observado que, em comparação com uma equivalente linha balanceada, uma redução na ociosidade é alcançada alocando-se aos recursos, em direção ao final da linha (1) tempos médios de processamento linearmente crescentes ou (2) variabilidades destes tempos também crescentes. Tais melhorias foram alcançadas, em ambos os casos com leves reduções nas taxas de produção da linha como um todo, porém no caso (1) com um aumento nas filas máximas em todas as estações e, no caso (2) com aumento nas filas máximas para as últimas 10 estações.

Por fim, concluem os autores, os resultados obtidos fornecem alguma confirmação ao trabalho de DAVIS (1966), que obteve, para linhas compostas por três recursos, algum aumento nas taxas de produção e redução nos níveis de ociosidade desbalanceando-se a linha no sentido de alocar tempos de processamento curtos, médios e longos entre os três recursos da linha. Também, acrescentam os autores, os resultados parecem não fornecer nenhuma evidência da eficiência do fenômeno *bowI*.

EL-RAYAH (1979a), através da simulação, testou o desempenho de três tipos de alocações de tempos médios de processamento: distribuição *bowI*, alocação baixo-médio-alto (proposto por DAVIS, 1966) e alternados (proposto por PATTERSON, 1964), segundo três formas de distribuição estatística dos tempos de processamento (log normal, normal, e exponencial) para linhas com até 20 recursos. De fato, neste artigo o tornou-se o primeiro pesquisador a usar a simulação para confirmar a existência do fenômeno *bowI*, proposto por HILLIER & BOLING (1966). Como resultado de seu trabalho, ficou constatado que resultados consistentes para todos os comprimentos de linhas indicam que a distribuição *bowI* é a mais apropriada quando a capacidade de estocagem de material em processo é limitada e há um substancial grau de variância nos tempos de processamento.

Em outro artigo, EL-RAYAH (1979b) simulou, através da distribuição normal dos tempos de processamento, linhas com três e quatro recursos, para testar a influência que alocações distintas de variabilidades nos tempos de processamento e as capacidades de pulmões de estocagem, e não mais alocações distintas de tempos médios de processamentos, tinham sobre o desempenho destas linhas.

Ficou novamente evidente a presença do fenômeno *bowI* no que tange à alocação desigual das variabilidades nos tempos de processamentos entre os recursos de uma linha de produção quando nenhum pulmão é permitido entre estes recursos. Neste caso, as linhas de produção reagiram de maneira bastante similar à alocação desigual de tempos médios de processamento. As estações do meio da linha devem ter menores variabilidades nos seus tempos de operações que as estações das extremidades, quando o objetivo é maximizar a taxa de produção desta linha.

O mesmo fenômeno não foi observado por EL-RAYAH (1979b) quando a alocação desigual de pulmões de estocagem foi o tema. Segundo o autor, a taxa de produção de uma linha, onde iguais capacidades de armazenagens são designadas, não pode ser significativamente melhorada desbalanceando deliberadamente estas capacidades de armazenagem, mas se o desbalanceamento é inevitável, a taxa de produção é maximizada designando-se pulmões

maiores às estações localizadas no meio da linha e menores pulmões às estações localizadas nas extremidades.

ATWATER & CHAKRAVORTY (1994) se propuseram a estudar o efeito que o uso de capacidade protetiva pode ter com relação a alguns critérios competitivos. Para tal, os autores simularam dois tipos de linhas de produção. A primeira é composta por quatro recursos com tempos médios de processamento iguais entre si (quatro recursos com 10 minutos de tempo médio de processamento). A segunda linha estudada é composta por cinco recursos com tempos médios de processamento diferentes entre si e linearmente crescente em direção ao último recurso da linha. Em outras palavras, o primeiro recurso (aquele que processa matéria-prima) possui um tempo médio de processamento menor (mais capacidade) que o segundo, que por sua vez é mais rápido que o terceiro, e assim por diante. Para que a quantidade total de tempo de processamento permanecesse constante em relação à primeira linha (40 minutos), foi alocado ao primeiro recurso um tempo médio de processamento de 6 minutos, ao segundo 7 minutos, 8 minutos ao terceiro, 9 minutos ao quarto e 10 minutos ao quinto recurso (totalizando também, portanto, 40 minutos). Nota-se que tal configuração está em consonância com o modelo proposto por DAVIS (1966).

O modelo representativo de uma linha desbalanceada, apresentado em ATWATER & CHAKRAVORTY (1994), proporcionaria, desta forma, uma certa capacidade protetiva de um recurso em relação àquele que o sucede. Após simular ambos os modelos em dois níveis de coeficiente de variação dos tempos médios de processamento e outros dois níveis de tempo de parada, ou *down time*, os autores chegaram a duas conclusões principais.

Primeiramente, os autores consideraram como válida a hipótese que o uso de capacidade protetiva é uma forma viável para se alcançar tempos de processamento mais rápidos com níveis de estoques mais baixos. Para os autores, isto é uma indicação que o uso de capacidade protetiva pode ser uma importante ferramenta para os gerentes dispostos a competir com *lead times* menores que a concorrência. Outro resultado de importante relevância para os autores foi que a linha com capacidade protetiva requer menos estoque em processo no sistema para alcançar tempos de processamento mais estáveis. Isto significa que além de prazos menores, o uso de capacidade protetiva pode também proporcionar prazos mais confiáveis. Isto tudo com baixos níveis de estoques em processo.

Há, no entanto, a necessidade de se fazer duas importantes observações em relação à metodologia de pesquisa empregada pelos autores e que se diferencia do método proposto para o trabalho deste autor. A primeira delas se refere ao fato que os autores fizeram uso de uma única

forma de gestão de materiais em seus estudos. De acordo com o que foi apresentado, tal forma se assemelha bastante com o sistema tipo CONWIP, ainda que os autores não o tenha mencionado. Não houve, portanto, a preocupação por parte dos autores em procurar validar os resultados obtidos simulando-se outros métodos de controle da produção.

Uma segunda observação se refere ao número distinto de recursos empregados nos modelos estudados. Ainda que o tempo de processamento total de ambos os modelos tenha se mantido constante, ao se variar o número de recursos entre os dois modelos, fica difícil avaliar se os resultados alcançados foram devidos ao fato da existência de capacidade protetiva em um modelo e inexistência em outro, ou então, porque um modelo tinha mais recursos que o outro. A impossibilidade de se isolar esta variável na análise dos resultados dificulta, ou ao menos limita, as hipóteses elaboradas ao final da pesquisa.

Outra interessante pesquisa se deu em FRY & RUSSELL (1993). Em estudo comparativo de diferentes formas de alocação de cargas entre os recursos, os autores comparam seis tipos de critérios de distribuição de cargas de trabalho entre recursos de uma fábrica fictícia que compartilha características tanto de um sistema *flow-shop* quanto de um sistema *job-shop*. Os seis critérios testados foram: balanceado, em forma de tigela (*bow*), tigela invertida ou “V”, linear, em passo (*step*) e segmentado. Em suas pesquisa, os autores avaliaram cada um dos critérios citados segundo três formatos de alocação de carga (mais acentuado, moderado e pouco acentuado), três níveis de excesso de capacidade (10, 15 e 20%) e dois níveis de coeficiente de variabilidade (alto e baixo).

Segundo esses autores, a primeira estratégia de alocação de cargas é igualar ou balancear os tempos de processamento em todas as estações de trabalho, a qual é defendida pela maioria da literatura de balanceamento de linha. Sob esta estratégia, cada máquina é utilizada por uma igual porcentagem de tempo.

A segunda estratégia é a já comentada forma de alocação de tempos de processamento conhecida como *bowl*. Uma terceira estratégia citada por FRY & RUSSELL (1993) é a chamada de “*bowl* invertido” (ou em “V”), onde os recursos situados no centro da linha recebem os maiores tempos de processamento, enquanto os recursos posteriores e anteriores a eles têm seus tempos de processamento reduzidos linearmente. Os autores não fazem nenhuma referência sobre pesquisas anteriores que estudaram este tipo de método de alocação de tempos de processamento aos recursos.

A quarta estratégia para alocação de capacidade é denominada de “linear decrescente” e representa o caso onde o recurso com o maior tempo de processamento é o primeiro da linha. Os

recursos subsequentes a ele passam a ter um decréscimo linear de seus respectivos tempos de processamento, de maneira que o último departamento da linha receberá o menor tempo de processamento. FRY & RUSSELL (1993) citam os trabalhos de DAVIS (1966) e EL-RAYAH (1979a) como os pioneiros nas pesquisas deste tipo de critério de alocação de cargas de trabalho. Outros defensores desta mesma estratégia são GOLDRATT & FOX (1989), que argumentam que a máquina mais lenta deveria ser localizada na frente do processo.

A quinta estratégia incluída em FRY & RUSSELL (1993) é a “segmentada”, sugerida por GOLDRATT (1981). A crença aqui é que as flutuações (variabilidades) nos processos tendem a se acumular na direção do fluxo de materiais numa linha de produção. Deste modo, um recurso é afetado pelas flutuações do recurso precedente e afeta o recurso subsequente. A sugestão de GOLDRATT (1981) é que o processo deveria ser segmentado em dois ou mais mini-processos, através de pulmões de capacidade cuidadosamente localizados, onde cada segmento se comporta segundo um projeto de alocação de capacidades linear. Por exemplo, numa linha de sete recursos poder-se-ia ter o quarto recurso com o maior tempo de processamento dentre eles, os recursos cinco, seis e sete teriam tempos de processamento linearmente decrescentes em relação ao recurso quatro e respectivamente idênticos aos do recurso um, dois e três. Desta maneira, os recursos que receberiam uma quantidade acumulada maior de flutuação ou variabilidade teriam mais capacidade para compensá-la.

A sexta e última estratégia é a alocação em “passo” ou “*step*”. Neste caso a primeira estação tem o maior tempo de processamento e as demais estações que a sucedem têm tempos de processamento levemente menores que a primeira, porém iguais entre si. WIGHT (1970) sugeriu este tipo de critério como forma de facilitar o controle de entrada e saída de tarefas pela linha, localizando a operação gargalo no início da linha. Esta estratégia seria então uma combinação entre balanceamento e aumento linear de capacidades de produção, com o gargalo localizado no início do processo de fabricação.

Os resultados obtidos por FRY & RUSSELL (1993) mostram que a apropriada alocação de capacidades é dependente do grau de flutuação dos processos e do tamanho da folga na capacidade. Em fábricas com baixo nível de excesso de capacidade ou com altos coeficientes de variabilidade, desbalancear intencionalmente a capacidade resultaria em desempenhos nunca piores que a alocação balanceada de cargas. Por outro lado, quando a folga na capacidade é alta, 20% no caso, a estratégia de balanceamento de capacidades deveria ser escolhida. Nas situações onde linhas desbalanceadas superaram as linhas balanceadas, os autores verificaram melhores resultados para as estratégias “linear” e em “V”.

DONOHUE & SPEARMAN (1993), também pesquisaram alguns critérios de alocação de capacidades. Em seus trabalhos, os autores examinaram o problema de se determinar a mais rentável configuração de capacidades para uma linha de produção composta de recursos em série. Para solucionar o problema proposto, os autores desenvolveram um modelo de decisão que considera simultaneamente os custos e as implicações operacionais de um projeto de capacidade. Tal modelo faz uso de uma técnica que mistura abordagens analíticas e de simulação.

No estudo, os autores modelaram as linhas de forma a contemplarem os princípios de controle da produção baseados na técnica CONWIP. Dois tipos situações de mercado foram examinados: uma caracterizada por uma demanda infinita, onde tudo o que é produzido é vendido e outra onde a demanda é limitada e a linha pode produzir para estoque. No primeiro caso, a liberação de uma nova ordem de fabricação se dá sempre que um item é finalizado no último recurso da linha, já que neste caso não há formação de produtos acabados na forma de estoque. No segundo caso, uma nova ordem só é liberada para fabricação quando o item final é consumido pelo mercado, abaixando o nível de estoque de produto acabado.

O papel da capacidade depende, no entanto, do ambiente de mercado na qual a empresa está operando. Em um ambiente de produção para estoque, melhorias de qualidade (que resultam em redução nos níveis de variabilidade dos tempos de processamento) acarretam uma menor necessidade para excesso de capacidade. Isto se deve ao fato que menores variabilidades levam a menos congestão na linha e, portanto, menos necessidades de se tirar atrasos. Por outro lado, num ambiente onde tudo o que é produzido é vendido, melhorias de qualidade fazem com que capacidades adicionais se tornem mais atrativas. Aqui, conforme a variabilidade decresce, a fábrica se torna capaz de produzir mais produtos com a mesma capacidade instalada.

Deve-se notar, por fim, que o trabalho proposto por DONOHUE & SPEARMAN (1993), tem como objetivo principal desenvolver um modelo que possibilite analisar fatores de desempenho operacional, custos correlacionados e situações de mercado e assim, tomar decisões referentes a melhor configuração de capacidades em linhas de manufatura que operem segundo a abordagem CONWIP.

WESTON JUNIOR (1999) pesquisou algumas possíveis configurações de linhas de manufatura com o propósito de estudar a influência que as localizações de gargalos na linha e a variabilidade dos tempos médios de processamento (CV) têm sobre o desempenho destas linhas de manufatura. O ambiente escolhido para simular as situações propostas é composto por 10 centros de trabalhos ou recursos, que podem tanto caracterizar uma linha de produção quanto uma célula de trabalho, em formato U, de peças discretas. Foram selecionados cinco modelos,

cada qual variando duas características em particular, a variabilidade dos tempos de processamento e a posição do recurso restritivo na linha. Os cinco modelos simulados são:

Modelo 1: Não há restrição na linha e os recursos são perfeitamente balanceados, isto é, possuem o mesmo tempo médio de processamento e a mesma variabilidade dos tempos médios de processamento. Cada recurso tem um tempo médio de processamento de 10.5 minutos e desvio-padrão de 2.958 minutos.

Modelo 2: Igual ao modelo 1, exceto que a variabilidade é alterada.

Modelo 3: Uma única restrição (com acréscimo de 15% no tempo médio de processamento em relação ao modelo 1) é localizada no meio da linha com variabilidade igual ao modelo 1.

Modelo 4: Uma única restrição (com acréscimo de 15% no tempo médio de processamento em relação ao modelo 1) é localizada no fim da linha com variabilidade igual ao modelo 1.

Modelo 5: Uma única restrição (com acréscimo de 15% no tempo médio de processamento em relação ao modelo 1) é localizada no início da linha com variabilidade igual ao modelo 1.

Em todos os modelos simulados as peças ou materiais são puxados por todo o sistema, não há limitação de estoque em processo entre cada recurso e os lotes de transferência são unitários. Os tempos de movimentação e *setup* são assumidos como zero. A disponibilidade de componentes ou matéria-prima é infinita.

Há duas formas de ocorrência de ociosidade. Uma peça já completa pode permanecer ociosa em frente a um determinado recurso, na forma de fila, porque o respectivo recurso está ocupado. Alternativamente, um recurso pode estar ocioso quando ele finaliza uma peça e não há peças em estoque para trabalhar. Estes tipos de ociosidade formaram a base para a análise dos resultados do autor. Uma maneira similar para se estudar as ociosidades é analisar os atrasos. O autor usa estes dois critérios indiscriminadamente.

Ao se comparar os resultados das simulações dos modelos 1 e 2, WESTON JUNIOR (1999) verificou que o aumento no CV degrada o desempenho do sistema, aumentando o tempo de processamento das peças (redução do *throughput*) e a ociosidade das peças e dos recursos. Também foi verificado que a eficiência dos recursos diminui conforme se dirige para o final da linha, no sentido do fluxo de material. Portanto, pode-se esperar que, segundo o autor, a eficiência dos recursos tende a diminuir como consequência dos efeitos acumulados da variação nos tempos médios de processamento entre recursos dependentes.

Como conclusão final, o autor finaliza dizendo que, ao se comparar o modelo 1 aos modelos 3, 4 e 5, pode-se afirmar que os resultados sugerem uma localização do gargalo no início da linha. Com esta disposição, tanto os níveis máximos e médios das filas são menores, como também o são os níveis médios e máximos do tempo de espera no gargalo. Assim, a localização do gargalo no início da linha é geralmente preferida baseada nas estatísticas de filas e no atraso total das peças, enquanto outras estatísticas, tais como o tempo total para finalizar todas as peças, não são impactadas.

Em resumo, este tópico procurou mostrar que, ainda que a maioria das pesquisas na área de projetos de linhas esteja baseada em único sistema de PCP, parece não haver uma resposta definitiva para qual melhor critério de alocação de tempos de processamento entre os recursos de uma linha de produção. Parte das pesquisas parecem defender a idéia que o método bowl é o mais efetivo (HILLIER & BOLING (1966), HILLIER & BOLING (1967), HILLIER & BOLING (1979), EL-RAYAH (1979a), KARWAN & PHILIPOOM (1989), SO (1989), SO (1990), HILLIER & SO (1993), PIKE & MARTIN (1994), HILLIER & SO (1996)), outra parte parece entender o fenômeno bowl como algo eficiente para situações muito particulares, porém difíceis de se encontrar na prática (SMUNT & PERKINS (1985), HOMPSON JUNIOR & BURFORD (1988), SMUNT & PERKINS (1989) e SMUNT & PERKINS (1990)). Há ainda outros autores que defendem outras técnicas de alocação de tempos de processamento como a alternada (PATTERSON, 1964), linearmente crescente em termos de tempos de processamento (DAVIS, (1966), PAYNE *et al.* (1972), ATWATER & CHAKRAVORTY (1994)), linearmente decrescente em termos de tempos de processamento (GOLDRATT & FOX (1989)) em “V” ou bowl invertido (FRY & RUSSELL (1993)), segmentada (GOLDRATT (1981)) e em passo ou *step* (WIGHT (1970), GOLDRATT & FOX (1989) e WESTON JUNIOR (1999)). Tais considerações, as quais mostram um alto grau de disparidade entre os resultados alcançados, somadas ainda à necessidade de se estudar como variações nos sistemas de PCP influenciam os desempenhos dos critérios de alocação, justificam plenamente o objetivo desta tese.

O próximo tópico dá início ao segundo grande ramo desta pesquisa: os sistemas de planejamento e controle da produção. Primeiramente serão apresentadas as diversas variantes dos sistemas tipo Kanban, incluindo sua forma tradicional. Em seguida a discussão é focalizada em torno do sistema CONWIP, antecedendo o tópico que aborda o método Tambor-Pulmão-Corda.

2.2 Os sistemas de planejamento e controle da produção

Este tópico tem como objetivo discutir alguns aspectos essenciais dos sistemas de planejamento e controle da produção. Ele estará dividido, basicamente em quatro partes. A primeira tratará do sistema Kanban e algumas das suas variantes. A segunda discutirá o sistema CONWIP, ficando a terceira parte dedicada ao método Tambor-Pulmão-Corda. Por fim, na quarta parte, é apresentada uma rápida revisão de textos que procuraram comparar sistemas de gestão da produção.

2.2.1 O sistema Kanban

O sistema Kanban faz parte de uma filosofia mais ampla de administração desenvolvida pela Toyota Motor Corporation, denominada de Sistema de Produção da Toyota. Segundo MONDEN (1984), este sistema pode ser considerado como um sistema de administração da produção revolucionário, compartilhando características do sistema Taylor (Administração Científica) e do sistema Ford (Linha de Montagem em Massa).

Conforme MONDEN (1984), “o Sistema de Produção da Toyota é um método racional de fabricar produtos pela completa eliminação de elementos desnecessários na produção com o objetivo de reduzir os custos. A idéia básica neste sistema é produzir as unidades necessárias no tempo necessário e na quantidade necessária. Com a realização deste conceito podem ser eliminados os inventários intermediários e os de produtos acabados, então desnecessários”. Ainda segundo o autor, para que o objetivo de reduzir custos seja alcançado, três outras metas intermediárias precisam ser atingidas simultaneamente:

1. Controle de Quantidade: permite à empresa adaptar-se às flutuações diárias e mensais da demanda em termos de quantidade e variedade;
2. Qualidade Assegurada: garante que cada processo irá suprir os processos subsequentes somente com unidades boas e conformes;
3. Respeito à Condição Humana: deve ser cultivado uma vez que o sistema utiliza o recurso humano como fonte de conhecimento para se atingir seus objetivos de custos.

Um fluxo contínuo da produção ou adaptação às mudanças da demanda em quantidades e variedades é criado pela obtenção de dois conceitos chaves, fundamentais para o Sistema de Produção Toyota: “*Just-in-Time*” (no tempo exato) e “Autonomação” (controle autônomo de processos ou autocontrole)

O *Just-in-Time* (JIT) implica produzir as unidades necessárias em quantidades necessárias e no tempo necessário. Autonomação (ou *Jidoka*, em japonês), por sua vez, pode ser

interpretado como controle autônomo de defeitos, viabilizando o *just-in-time* por nunca permitir que uma unidade defeituosa siga o fluxo e alcance um processo subsequente. Outros dois conceitos básicos do Sistema Toyota de Produção são “flexibilidade da mão-de-obra” e “pensamento criativo”. Para que todos estes conceitos sejam realizados, deve-se estabelecer os seguintes sistemas e métodos segundo MONDEN (1984):

1. Sistema Kanban para manter a produção no tempo exato;
2. Métodos regulares de produção para adaptação às variações da demanda;
3. Redução do tempo de preparação de máquinas para reduzir os tempos de execução de produção;
4. Padronização das operações para obter balanceamento de linhas;
5. *Layout* do Posto de Trabalho e operários com multifunções para se alcançar flexibilidade da mão-de-obra;
6. Aperfeiçoamento das atividades através de pequenos grupos e sistemas de sugestões para reduzir a mão-de-obra e aumentar a moral dos trabalhadores;
7. Sistema de controle visual para se atingir o conceito de autonomia;
8. Sistema de Administração por Funções para promover o controle de qualidade em toda a empresa.

O Sistema Toyota de Produção é para alguns autores sinônimo de filosofia JIT. PTAK (1991) escreve que a filosofia JIT pode ser vista como uma contínua e infindável cruzada para a eliminação total de desperdícios e respeito às pessoas. Isto deve ocorrer não somente no processo de manufatura, mas através de toda a organização para que a implementação possa ser bem sucedida. Segundo os autores, como resultados desta implementação estão a redução nos *lead-times*, inventário e espaço necessário para a manufatura, rendendo uma maior competitividade à companhia. O objetivo não seria atingido pela instalação de programas de computador, mas sim devido ao esforço cooperativo de todos na organização, desde o presidente até os trabalhadores de chão-de-fábrica, envolvendo todos os recursos humanos disponíveis na empresa. Novos sistemas têm que ser desenvolvidos para acomodar as novas formas de se fazer os negócios. Ordens de serviço, papéis de fábrica e práticas contábeis geralmente aceitas foram modificadas e estão ainda passando por mudanças dramáticas como resultado destes amplos conceitos filosóficos.

LOCKAMY & COX (1991) citam que as técnicas associadas aos aspectos de manufatura JIT sofreram algumas mudanças e hoje pode ser composta por doze técnicas principais:

1. Método de puxar a produção (Kanban);
2. Controle estatístico de processo;
3. Manutenção preventiva;
4. Trabalhadores multifuncionais;
5. Nível de programação;
6. Redução de *setup*;
7. Revisão de *layout* de fábrica;
8. Tamanhos de lotes reduzidos;
9. Envolvimento de fornecedores;
10. Organização do local de trabalho;
11. Atividades de melhoria a partir de pequenos grupos;
12. Engajamento gerencial.

Pode-se notar, portanto, que o método Kanban, foco deste tópico, é apenas um método de gestão da produção, o qual possibilita que a produção possa ser **puxada**, pertencente a uma filosofia mais ampla de gestão organizacional denominada *just in time*. Para que se possa compreender o exato significado da técnica Kanban, se faz necessário o entendimento dos conceitos de produção puxada e empurrada.

GSTETTNER & KUHN (1996) e SPEARMAN et al. (1990) dividem genericamente os sistemas de controle de produção em sistemas de “puxar” e “empurrar” a produção. Para estes autores, em sistemas do tipo “empurrar”, a produção é iniciada a partir de uma instância central de planejamento que faz uso de previsões para demandas futuras. A produção neste caso é iniciada antes da ocorrência da demanda, pois de outra maneira os bens não poderiam ser entregues dentro do prazo. Portanto, os *lead times* de produção têm de ser conhecidos ou aproximados.

Em um sistema de “puxar”, a produção começa quando a demanda acontece de fato. A produção é iniciada por um sistema de controle descentralizado. Para evitar longos tempos de espera para os clientes, peças e produtos acabados devem ser estocados nos chamados *buffers* ou pulmões. Logo, os sistemas de “puxar” são chamados de sistemas com nível mínimo de inventário enquanto que os sistemas de “empurrar” são conhecidos como sistemas de inventário zero.

Em sistemas de “puxar”, um certo nível de inventário de peças e produtos acabados é planejado para evitar as desvantagens dos sistemas de “empurrar”. Segundo GSTETTNER &

KUHN (1996), o inventário planejado compensa as falhas, quebras de máquinas e incertezas na demanda. O nível de estoque em processo deve ser escolhido apropriadamente para garantir o nível de serviço desejado do sistema de produção sem a necessidade de um detalhado planejamento de produção.

Os autores lembram, no entanto, que para atingir estes objetivos, com níveis razoáveis de estoque em processo, tornam-se necessárias algumas mudanças organizacionais. Entre elas citam-se: redução dos tempos de preparação de máquinas, melhoria na qualificação dos trabalhadores e produção orientada a objeto.

GSTETTNER & KUHN (1996) classificam então os sistemas de “puxar” a produção quanto à forma que o fluxo de informação ocorre nos sistemas produtivos. Para estes autores, pode-se distinguir os sistemas de “puxar” através do momento que a informação referente à demanda é transmitida aos recursos e o caminho que esta informação toma.

A informação sobre a demanda do produto final é sempre iniciada no pulmão final. Os sistemas de “puxar” a produção podem agora ser especificados pela forma como a informação flui pela linha de produção. As células de produção ou máquinas podem ser informadas sobre a demanda tanto de forma direta (a partir da última estação de trabalho no roteiro de produção) ou indireta (a partir da estação que a sucede).

Detalhes sobre as diversas variações dos sistemas Kanban baseadas no modo como as informações fluem ao longo dos processos de produção podem ser encontrados em SPEARMAN et al. (1992), CHANG & YIH (1994), GSTETTNER & KUHN (1996) e BONVIK *e. al.* (1997).

Ainda para GSTETTNER & KUHN (1996), os sistemas de “puxar” com fluxo de informação indireto das estações sucessoras podem ainda ser diferenciados do ponto de vista do momento em que uma estação solicita material do pulmão de saída da estação precedente. Duas alternativas básicas podem ser identificadas. Na primeira alternativa material é levado do pulmão da estação precedente imediatamente depois que a informação sobre a demanda chega à estação. Já na segunda alternativa, material não é levado até que a estação posterior esteja pronta para iniciar a produção.

De uma maneira mais formal, GSTETTNER & KUHN (1996) definem ou denominam a primeira alternativa como sistema Kanban com “transferência imediata de material” (*Immediate material transfer* - IMT) e a segunda alternativa de sistema Kanban com “transferência de material tardia” (*late material transfer* - LMT). A principal diferença entre os dois sistemas está nos possíveis níveis de estoque em processo entre duas estações e na taxa de produção do sistema de manufatura. Estudos semelhantes abordando o problema do momento em que a

transferência de peças é autorizada pelos cartões Kanban e seus impactos no nível médio de estoque em processo e na taxa de produção esperada são também encontrados em BERKLEY (1991) e TAKAHASHI et al. (1996).

BERKLEY (1991) cita como a forma mais simples de controle de produção baseado em Kanban, um sistema onde a quantidade de requisição é fixada em um *container* e é chamado de *base stock*. Este sistema opera da seguinte forma: entre cada par de estações, estação anterior i e estação posterior $(i + 1)$, existe um único pulmão de estoque de peças. Este inventário é comumente localizado no ponto de estocagem da estação i . O máximo número *containers* cheios permitidos na estação i é chamado de nível de estoque base (daí o nome *base stock*). Cada vez que a estação $(i + 1)$ requer peças, esta retira um *container* do ponto de estocagem da estação i .

A produção de um *container* é autorizada na estação i quando seu inventário de *containers* cheios cai abaixo de seu nível de estoque base. Se o número de *containers* cheios é igual ao nível de estoque base, a estação i está bloqueada. O sistema *base stock* se adapta melhor às operações de montagens onde as estações são localizadas fisicamente juntas, ao longo de uma mesa ou de uma bancada, e quando os *containers* cheios de peças podem ser facilmente transportados entre as estações. Neste caso, o tamanho econômico do lote é de um *container*.

Conforme a distância física entre as estações de trabalho aumenta, o lote ou o tamanho do *container* aumenta, ou então as peças tornam-se tão pesadas para serem passadas entre as estações de trabalho que o sistema Kanban tipo *base stock* torna-se impraticável. Devido ao custo de manipulação de material que cada início de operação acarreta, tal procedimento torna-se impraticável. A solução é desempenhar as operações de manipulação de material periodicamente. Para o autor, em muitos ambientes *job shops*, estas operações ficam a cargo de uma equipe responsável pelo transporte de peças.

Quando o manuseio de material é feito periodicamente, cada estação deve possuir estoques de peças na entrada da estação (com componentes ainda não processados pelo recurso produtivo) e na saída da estação (com componentes já processados em estoque). Este tipo de sistema, denominado sistema Kanban com dois cartões, foram projetados para ambientes baseados em lotes de produção onde cada manuseio de material ocorre periodicamente. Sistemas com dois cartões possuem tanto kanbans de requisição quanto de produção. Cartões de produção servem como ordens de produção para repor os *containers* de peças acabadas retiradas do ponto de estocagem da estação. Os kanbans de requisição servem como autorizações para o transporte de material para cada período de manuseio de material.

Ainda segundo BERKLEY (1991), nos sistemas com dois cartões cada estação i possui duas filas de material, uma na entrada do recurso e outra na saída deste. É assumido que a estação i retira material da estação $i - 1$, referida como estação anterior. A produção na estação i é então “puxada” a partir da demanda da estação $(i + 1)$, referida como estação posterior. Peças são movidas em *containers* padrão e sofre processamento em todas as estações. O autor exemplifica dizendo que cada tipo de peça j sofre processamento na estação um, depois na estação dois até a estação v . Quando uma linha processa múltiplos tipos de peças, deve haver ao menos, para cada tipo de peça, um kanban de produção em cada estação e um kanban de requisição circulando entre cada par de estações.

O mesmo autor descreve o mecanismo de funcionamento do sistema kanban de controle de produção com dois cartões através dos seguintes passos:

1. Periodicamente um carregador de peças remove todos os kanbans do posto de requisição (*withdrawal kanban post*) da estação $(i + 1)$ e os leva ao ponto de estocagem da estação i . O tempo decorrido entre os movimentos de kanbans de requisição é chamado, segundo o autor, de tempo de processamento de requisições (*withdrawal cycle time*).

2. Assumindo que as peças correspondentes aos kanbans de requisições estão disponíveis na saída da estação i (*output material queue*), o carregador destaca os kanbans de produção presos nos *containers* cheios e os coloca no posto de recebimento de kanbans (*kanban receiving post*). É assumido que estes kanbans serão então instantaneamente movidos e colocados no posto de kanbans de ordens de produção (*production-ordering kanban post*).

3. Para cada kanban de produção destacado, o carregador de peças prende em seu lugar um kanban de requisição. Se as peças correspondentes aos kanbans de requisição não estão disponíveis no estoque de saída de peças, os kanbans de requisição permanecem na forma de fila (*withdrawal kanban queue*) em frente a estação i , e os carregadores então retornam à estação $(i + 1)$. BERKLEY (1991) salienta neste ponto que a presença de uma fila de espera de kanbans de requisição pode identificar a presença de ordens em atraso. É possível, portanto, ter-se a presença simultânea de uma fila de kanbans de requisição ao lado de *containers* cheios de materiais na saída da estação i .

4. O carregador retorna com os *containers* cheios e seus respectivos kanbans de requisição para o estoque de entrada de material da estação $(i + 1)$. É assumido que o tempo gasto em cada transporte é zero.

5. Assumindo que a estação $(i + 1)$ está ociosa, que um kanban de produção está disponível em seu posto de kanbans de ordens de produção, e que um *container* cheio de peças

(com um kanban de requisição preso a ele) está disponível em seu estoque de entrada, o trabalho pode começar. Quando isto acontece, o kanban de requisição é destacado do *container* cheio e colocado no posto de kanbans de requisição.

6. Quando a estação $(i + 1)$ completa um *container* de peças, ele remove os correspondentes kanbans de produção do posto de kanbans de ordens de produção e os prende aos *containers* que acabaram de ser completados. O *container* cheio, com o kanban de produção preso a ele é então levado para o estoque de material localizado na saída da estação $(i + 1)$, permitindo desta forma que os carregadores da estação seguinte possam retirar os *containers* a qualquer momento. Se um kanban está esperando na fila de kanbans de requisição por um *container* de peças a ser completado, assim que este container estiver disponível será levado imediatamente à estação seguinte pelo operador da estação $(i + 1)$.

A figura 2.1 a seguir, extraída de MONDEN (1984), ilustra o modo como cartões de requisição e de produção circulam dentro e entre recursos.

FIGURA 2.1: O Fluxo dos dois Kanbans (baseado em MONDEN 1984)

AGGARWAL (1985) comenta que o sistema kanban assume que a taxa de produção na linha de montagem final é regular. Revisões no plano mestre de produção, necessários para satisfazer as modificações nas condições de mercado, devem ser pequenas. Para o autor, o Kanban não pode tolerar flutuações de carga de mais de 10%. Isto também exige que os programas diários para cada peça ou montagem permaneçam estáveis todos dias.

A seguir é apresentado o sistema CONWIP, um método alternativo ao sistema Kanban, mas que ainda mantém alguns pressupostos em comum, como por exemplo ser baseado na estratégia de puxar a produção a partir das necessidades da demanda.

2.2.2 O SISTEMA CONWIP

A técnica CONWIP (*CON*stant *W*ork *I*n *P*rocess - estoque em processo constante) foi inicialmente introduzida em 1990. A principal motivação para a sua criação foi a de estender o escopo de aplicação dos sistemas de manufatura JIT para ambientes onde a abordagem Kanban foi considerada inapropriada.

Segundo SPEARMAN et al. (1990), a aplicabilidade do método Kanban fica difícil, ou até mesmo impraticável, quando as seguintes características são encontradas:

- Ordens de trabalho com tempos curtos de produção;
- Tempos de *setup* significativos;
- Altas perdas por refugo e;
- Demanda com altas e imprevisíveis flutuações.

Desta forma o sistema CONWIP foi desenvolvido com o intuito de superar algumas limitações das tradicionais políticas de controle da produção baseadas em cartões Kanban. Em particular, linhas que produzem muitos tipos de peças diferentes encontram sérios problemas práticos. Com múltiplas células e muitos tipos de peças, torna-se pouco viável manter-se espaço de estocagem suficiente para armazenar um *container* padrão ou um Kanban para cada tipo de peça existente, e mesmo que se superasse este problema, o nível de estoque em processo seria muito alto.

Uma outra questão, também associada ao problema anterior, refere-se aos altos tempos gastos com *setup* relacionados com o fluxo de múltiplas peças. Tal obstáculo pode ser superado, entretanto, aplicando-se técnicas de sequenciamento na lista de “*backlog*” para controle no ponto de entrada do sistema. O uso destas técnicas na abordagem CONWIP será oportunamente comentado mais adiante.

Assim, com o objetivo de desenvolver um sistema que mantivesse os benefícios de um sistema de puxar a produção e ainda pudesse ser aplicado a uma ampla faixa de ambientes de manufatura, foi criado o CONWIP. O sistema CONWIP é uma forma generalizada de Kanban, uma vez que é também baseado em sinais, sejam eles eletrônicos ou cartões. Entretanto, no CONWIP, os cartões realizam um circuito que inclui a linha de produção inteira. Para tanto, um cartão é fixado a um *container* padrão de peças no início da linha. Quando um *container* é usado

no final da linha o cartão é removido e enviado de volta para o início, onde ele espera na fila de cartões para eventualmente ser fixado a outro *container* de peças.

Enquanto no sistema Kanban cada cartão é usado para sinalizar a produção de uma peça específica, no CONWIP os cartões são designados para toda a linha de produção e não correspondem a uma peça específica. A necessidade específica de uma peça é determinada segundo uma lista (*backlog*) de itens demandados. Quando trabalho é necessário ao primeiro centro de processamento da linha, um cartão é removido da fila e marcado com o primeiro tipo de peça da lista (*backlog*) para o qual matéria-prima ou componentes estão presentes. As figuras 2.2 e 2.3 a seguir procuram mostrar as diferenças de controle entre os sistemas Kanban e CONWIP.

FIGURA 2.2: Controle Kanban. O movimento de peças é mostrado em azul e a circulação de kanbans em verde. As máquinas estão ilustradas como círculos enquanto os triângulos representam os estoques ou *buffers*. O último *buffer* é o estoque de produtos acabados (PA)

FIGURA 2.3: Controle CONWIP. O movimento de peças é mostrado em azul enquanto que a circulação de autorizações para liberação está em verde

Ainda para SPEARMAN et al. (1990), em muitas situações o *backlog* é gerado a partir de um programa mestre de produção adicionando-se pedidos firmes assim que eles são recebidos. A manutenção deste *backlog* é de responsabilidade do pessoal de controle da produção e aos expedidores são permitidos re-arranjar o *backlog* e/ou adicionar peças a ele, mas

sob nenhuma circunstância é permitido que estes forcem a entrada de trabalho sem um cartão presente, mesmo que o primeiro centro de processamento esteja ocioso. Aqui podem ser ainda aplicadas técnicas de sequenciamento para os casos onde o tempo de *setup* é alto.

O sistema de sequenciamento usado para disciplinar o processamento de todos os centros de trabalho da linha é o FSFS (*first in system first served* - primeiro a chegar no sistema será o primeiro a ser servido). A exceção fica por conta das tarefas de re-trabalho, às quais são dadas as mais altas prioridades.

Em resumo, o CONWIP libera produto na entrada do sistema de produção baseado no consumo de produto acabado pela demanda e, então, material é empurrado por todo o sistema de produção até o estoque de produtos acabados. As demandas diárias removem os produtos dos estoques de produtos acabados, os cartões são destacados e enviados para o início da fila a qual autoriza a produção de outra peça. A taxa de demanda dita a autorização para a produção, mas é a primeira operação que dita a real taxa de liberação para o sistema.

Pode-se dizer que a abordagem CONWIP permite que existam cartões em três formas distintas no sistema: aqueles autorizados para a produção no início da fila, aqueles na forma de estoque de material em processo e aqueles estocados na forma de produtos acabados.

O CONWIP regula a taxa de produção diretamente mantendo a taxa de liberação para o sistema igual à taxa de demanda. Na ausência de demanda, inventário se acumula na forma de produtos acabados e nenhum trabalho adicional é liberado ao sistema. Normalmente, os estoques de materiais em processo tenderão a se acumular em frente à operação gargalo criando, portanto, o efeito desejado de alta utilização do gargalo e, assim, maiores fluxos de produção. Quando a demanda diminui, entretanto, o método CONWIP reduz os níveis de inventário interno a quase zero, pois estes se acumularão na forma de produtos acabados, e a liberação de trabalho para o sistema é reduzida. Por outro lado, se a demanda aumenta, uma suficiente quantidade de tarefas deve ser introduzida no sistema de maneira que raramente a estação gargalo fique ociosa, mas não tão sobrecarregada a ponto de se formar imensas filas e altos tempos de espera.

Caso a demanda não possa ser satisfeita a partir do estoque de produtos acabados, esta fica acumulada e aos produtos correspondentes a esta demanda é dada prioridade máxima. Perdas de rendimento por todo o processo (perdas por qualidade, por exemplo) é controlada destacando-se o cartão, desfazendo-se do produto e automaticamente re-circulando o cartão para o início da fila, autorizando, assim, a liberação de outra peça ao sistema.

Ainda para os autores, o CONWIP é atraente porque há um único ponto de controle; um parâmetro (por produto) é necessário para controlar a produção de todo o sistema. Isto se torna

ainda mais evidente quando comparado aos múltiplos pontos de controle necessários em um sistema com várias operações gerenciado pela abordagem Kanban tradicional. Assim, o CONWIP é freqüentemente usado como um primeiro passo para a implementação de controles baseados na lógica de puxar a produção quando a variabilidade dos dados do sistema não é bem conhecida. Ele permite, portanto, uma abordagem mais segura para os praticantes de Kanban, estabelecendo parâmetros de inventário mais altos e gradualmente reduzindo-os conforme os gargalos são identificados.

Segundo as definições anteriormente apresentadas, fica claro que, assim como os sistemas Kanban, os sistemas CONWIP também se enquadram como sistemas de puxar a produção. A diferença é que no CONWIP a autorização de trabalho se dá em locais mais específicos da linha (em um recurso gargalo, recurso estratégico, último recurso da linha, etc.) enquanto que nos sistemas Kanban puros esta autorização acontece, tipicamente, a partir do complemento de uma tarefa em qualquer recurso da linha.

HOPP & SPEARMAN (1996) ressaltam que os maiores benefícios inerentes aos sistemas de puxar não estão relacionados ao simples fato destes sistemas puxarem peças entre os recursos produtivos. Isso, segundo os autores, seria apenas um meio de se alcançar o objetivo final. Para esses autores, o verdadeiro benefício dos sistemas de puxar a produção é que neles existe um limite para a quantidade máxima de estoque no sistema. Mais informações sobre sistemas de empurrar e puxar a produção podem ser encontradas em SARKER & FITZSIMMONS (1989) e SPEARMAN & ZAZANIS (1992).

Desta maneira, em um sistema Kanban com dois cartões, o número de cartões de produção e transporte limita o total de *containers* padrão de peças que podem estar no sistema. Da mesma forma, nos sistemas Kanban de um cartão, o número de *containers* padrão é limitado pelo número de cartões de produção. Assim, não importa o que aconteça na fábrica, o nível de WIP não pode exceder um limite pré-fixado.

HOPP & SPEARMAN (1996) também fazem algumas comparações entre o CONWIP e o método Kanban, procurando mostrar que, embora ambos sejam caracterizados como sistemas que puxam a produção e, portanto, possuem desempenhos semelhantes, há algumas importantes diferenças entre estas duas abordagens. Embora certas diferenças já tenham sido relatadas anteriormente, foi considerado importante reconsiderá-las à luz de novas conclusões e de um melhor detalhamento. São estas as diferenças citadas pelos autores:

Diferenças nos cartões: há duas diferenças a serem consideradas aqui. A primeira refere-se ao número de cartões que cada sistema deve estabelecer e controlar. Nos sistemas Kanban de

um cartão, o usuário deve estabelecer uma quantidade apropriada de cartões para cada estação de trabalho. No caso dos sistemas Kanban com dois cartões, há o dobro de cartões para se estabelecer. Por outro lado, em um sistema CONWIP há somente um único parâmetro para controlar a quantidade de cartões em toda a linha. Como “controlar” implica em ajustar e analisar continuamente o sistema, o CONWIP seria sem dúvida muito mais simples de controlar que o Kanban.

O segundo ponto relaciona-se às especificações que devem estar contidas nos cartões em cada sistema. O sistema Kanban especifica, em cada cartão, a peça/número correspondente, enquanto no CONWIP existe uma especificação referente à linha de produção. O impacto desta diferença é muito grande em termos de flexibilidade dos dois sistemas. Como, no sistema Kanban, os cartões identificam o tipo de peça que eles estão autorizando a produção, os sistemas Kanban, em sua forma pura, deve incluir *containers* padrão de WIP para cada peça/número ativa na linha. Se isto não for feito, um recurso posterior poderia gerar uma demanda no recurso precedente a qual não poderia ser satisfeita. O problema é que, segundo o método do Kanban, muitas peças, ainda que ativas, são produzidas ocasionalmente, uma ou duas vezes por ano, e acabariam sendo mantidas em estoque, desnecessariamente, por muito tempo. Caso se optasse por retirá-las do estoque, a cada vez que surgisse um pedido por estas peças de baixa demanda, gerar-se-ia demandas não satisfeitas, do fim ao início da linha, passando por cada recurso dentro do roteiro de fabricação. O tempo decorrido, no entanto, para se iniciar a fabricação no início da linha, percorrendo todo o roteiro de produção até que a fabricação da peça esteja finalizada, seria muito maior que as respostas normais às demandas no final da linha, o que comprometeria todo o protocolo *just-in-time*.

Em contraste, o sistema CONWIP propõe um método de trabalho bastante diferente. Uma vez que no CONWIP não há identificação de peça/número nos cartões, a sequência de peças que devem ser produzidas é estabelecida em um *backlog* gerado fora do *loop* do CONWIP, de maneira análoga ao MPS (*Master Production Scheduling*) dos sistemas MRP (*Material Requirement Planning*). Desta forma, dependendo do *backlog*, a cada vez que um cartão retorna para frente da linha CONWIP, pode-se autorizar a liberação para a linha de uma peça diferente daquela que acompanhava o referido cartão.

Também, por usar o conceito de *backlog* e suas especificações serem referentes à linha e não à peça/número, os sistemas CONWIP não necessitam manter em estoque cada tipo de peça ativa. Se a quantidade de cartões na linha CONWIP é w , então, no máximo, w tarefas poderão estar na linha, número este geralmente muito menor que o número de peças ativas normalmente

encontrado em ambientes multi-produtos. Se a peça não é necessária nos próximos meses, então esta não estará no *backlog* e, portanto, não será liberada para a linha. Quando surge uma demanda por uma peça de baixo volume, o *backlog* liberará a autorização para a produção desta peça com um apropriado *lead time* para acomodar o tempo de produção na linha, mantendo-se, deste modo, o protocolo *just-in-time*.

Mix de produção: o sistema Kanban tem sua aplicabilidade limitada a ambientes estáveis, com pouca variação no volume e no *mix* de produção. Uma vez que o sistema Kanban se propõe a proporcionar um fluxo suave de material pela fábrica, mudanças freqüentes de volume e *mix* prejudicariam sobremaneira este fluxo desejado. Ainda que também requeira um volume estável de produção, o CONWIP é muito mais robusto que o Kanban à variação de *mix*, devido a sua capacidade de gerar trabalho a partir de uma lista ou *backlog*.

A limitação dos sistemas Kanban quanto ao *mix* de produção não se limita apenas à quantidade de WIP necessário no processo, como salientado anteriormente. Quando peças distintas requerem variações significativas nos tempos de processamento dos recursos, é comum deparar-se com situações onde mudanças no *mix* acabam levando a mudanças na localização do recurso gargalo. Já que é desejo de todos procurar proteger o recurso gargalo com mais WIP para evitar sua parada por falta de material, ao se permitir que a produção acompanhe as mudanças de *mix* da demanda, isto poderia gerar muitas dificuldades aos sistemas Kanban. Em outras palavras, se a quantidade ótima de cartões depende do *mix*, para se atingir alto *throughput* com baixo WIP, necessita-se dinamicamente variar a quantidade de cartões no tempo. Desde que já foi argumentado que estabelecer ou controlar o número de cartões em sistemas Kanban não é uma tarefa trivial, esta alternativa teria muita dificuldade de ser implementada com sucesso.

De maneira distinta, o CONWIP tem um único tipo de cartão. Portanto, desde que a taxa de produção permaneça relativamente constante, não há necessidade de se alterar o número de cartões no sistema quando ocorrem variações no *mix*. Além disso, devido às forças que governam o comportamento dos recursos gargalos, o WIP irá acumular-se, naturalmente, na frente do recurso gargalo. Por tal comportamento não depender de nenhuma intervenção do pessoal de fábrica, o CONWIP, além de mais eficiente, é também mais fácil de gerenciar que o sistema Kanban.

Quando comparado com o método Tambor-Pulmão-Corda ou TPC (maiores detalhes sobre o TPC serão vistos em capítulo dedicado ao tema), o CONWIP pode apresentar algumas semelhanças. Ambos os métodos, por exemplo, procuram manter seus níveis de estoque constantes no tempo (no TPC este estoque igual à soma dos pulmões de tempo do sistema) e

criaram mecanismos que buscam explorar a capacidade de produção do recurso gargalo. HOPP & SPEARMAN (1996) reconhecem que o sistema CONWIP básico (e também o Kanban) pode falhar em certos ambientes devido a ocorrência de duas situações distintas:

a) O recurso gargalo pode parar por falta de material devido às eventuais falhas em recursos localizados depois dele no roteiro de produção. Pode-se permitir, para corrigir esta situação, que se libere material para a linha além das liberações autorizadas pelos cartões.

b) Podem ocorrer liberações prematuras devido a necessidade de se manter constante o nível de WIP. Quando o nível de WIP cai abaixo de seu nível alvo, o CONWIP pode disparar a liberação de material para a linha, mesmo que este material resultará em produtos desnecessários aos próximos meses. Isto reduz a flexibilidade do sistema quanto a mudanças de engenharia ou das necessidades dos clientes.

Os autores propõem algumas alterações para acomodar estas situações, permitindo que o recurso gargalo possa adiantar seu programa mas, ao mesmo tempo, evite que este se adiante em demasia em relação às necessidades da demanda. Confirmando as semelhanças de proposições entre os dois sistemas, HOPP & SPEARMAN (1996) sugerem o uso das técnicas presentes no método Tambor-Pulmão-Corda, o qual ele generaliza posteriormente denominando-o de “puxar a partir do gargalo”.

Inicialmente, como ilustra a figura 2.4, os autores citam o uso de um mecanismo onde o nível de WIP é mantido constante entre o primeiro recurso da linha e o recurso gargalo, permitindo que os estoques fltuem livremente após o gargalo. Como os recursos localizados após o gargalo têm, por definição, mais capacidade, na média, que o recurso gargalo, os aumentos nos níveis de estoque depois do gargalo serão apenas temporários e, principalmente, não ocasionarão a paralisação do recurso gargalo. Entretanto, se a situação é de mudanças na localização do recurso gargalo segundo as variações no *mix* de produção, se torna impossível escolher um ponto a partir do qual a produção será puxada, e a melhor alternativa continua sendo a de puxar materiais a partir do fim da linha (usando um CONWIP regular) e permitir uma política de déficit nos cartões.

FIGURA 2.4: Um sistema de puxar a produção a partir do gargalo. Adaptado de HOOP & SPEARMAN (1996)

Finalizando as revisões teóricas sobre sistemas de planejamento e controle da produção, o tópico que se sucede abordará o método Tambor-Pumão-Corda, da Teoria das Restrições, desenvolvido por Eliyahu M. Goldratt.

2.2.3 O método tambor-pulmão-corda (*drum-buffer-rope*)

Criada pelo físico israelense Eliyahu M. Goldratt na década de 80, a Teoria das Restrições foi inicialmente fundamentada em programas de computação com o objetivo de desenvolver e implementar um sistema de programação de produção com capacidade finita, para resolver problemas de chão de fábrica. Este sistema ficou conhecido como OPT (*Optimized Production Technology*) e sua aplicação tornou-se para muitos sinônimo de Teoria das Restrições (*Theory of Constraints* - TOC).

Vale aqui ressaltar que a TOC é hoje algo muito mais amplo que o OPT. Enquanto o OPT é um software de programação de produção, a TOC é vista atualmente como uma ampla filosofia gerencial, com fundamentos e conceitos bem definidos, abrangendo soluções que não se restringem apenas a ambientes de manufatura típicos ao OPT. De fato, pode-se dizer, segundo SPENCER & COX (1995b) e GOLDRATT (1998), que a Teoria das Restrições se divide hoje em três grandes grupos de atuação: 1) os diagramas de causa-e-efeito denominados de Processos de Raciocínio com suas cinco ferramentas fundamentais (árvore da realidade atual, diagrama de dispersão de nuvem, árvore da realidade futura, árvore de pré-requisitos e árvore de transição); 2) o uso das definições ganho, inventário e despesa operacional como norteadores para tomadas de decisões e; 3) seus aplicativos em gerenciamento de distribuição, marketing, gerenciamento de projetos, o método Tambor-Pulmão-Corda, entre outros. Mais detalhes das diferenças entre

TOC e OPT e suas genealogias pode ser encontrados em RONEN & STARR (1990) e SPENCER & COX (1995b). Um histórico de como o OPT evoluiu para a TOC pode ser encontrado em GOLDRATT (1988).

De acordo com os pressupostos presentes na Teoria das Restrições (GOLDRATT, 1991), restrição é qualquer coisa que limita um sistema em conseguir maior desempenho em relação a sua meta. Na analogia de uma corrente cujo objetivo é resistir à tração, restrição seria o elo mais fraco. Pode-se afirmar, devido às flutuações estatísticas presentes, que todo sistema possui pelo menos uma restrição ou que toda corrente possui sempre um elo mais fraco. Tal afirmativa pode ser comprovada ao se analisar a realidade dos sistemas produtivos. Se tais sistemas não possuem restrições, ou seja, se nada limita seus desempenhos, qual seria então seu lucro líquido? Uma vez que não existe nenhuma empresa capaz de gerar um lucro operacional infinito, fica claro que sempre existirá ao menos uma restrição que limitará o ganho de qualquer tipo de organização.

GOLDRATT (1991) advoga que existem diversos tipos de restrições. Estas podem ser físicas, como uma máquina com baixa capacidade produtiva, despreparo ou baixo número de empregados, ou então restrições não físicas, como as restrições de política da empresa, comportamentais, culturais ou de mercado. Entretanto, como salienta o autor, as restrições físicas podem ser consideradas, na maioria das vezes, como reflexos das restrições comportamentais ou de procedimentos da organização.

FAWCETT & PEARSON (1991) preferem dividir os conceitos de restrição em duas categorias, externa e interna. Para os autores, restrições externas são governadas pelo mercado e, portanto, estão freqüentemente além do controle da empresa. Entretanto, uma vez que as restrições externas ou de mercado afetam a demanda, estas influenciam o *mix* de produtos da firma, o qual, por sua vez, afetam os níveis de utilização dos recursos. As restrições internas, por outro lado, podem existir sob diversas formas, incluindo capacidade limitada dos recursos, regras de trabalho pouco flexíveis, habilidade da mão-de-obra e filosofia gerencial. Deve-se notar que, para FAWCETT & PEARSON (1991), restrições políticas ou comportamentais, como definidas por GOLDRATT (1991), estão inclusas na categoria de restrições internas.

Ainda segundo GOLDRATT (1991), toda organização é formada ou constituída com um propósito principal e que este é, na verdade, determinado por seus proprietários ou por seus acionistas, que investem recursos com um determinado objetivo. Se a empresa possui ações negociadas no mercado de capitais, certamente a meta é “ganhar mais dinheiro tanto agora como no futuro”.

Definido o objetivo, a empresa deve agora encontrar as medidas necessárias para guiar e controlar seus esforços na direção de sua meta. Para GOLDRATT (1991), medidas financeiras são necessárias por dois motivos principais. A primeira é controle, ou seja, saber até que ponto a empresa está conseguindo alcançar o objetivo de gerar dinheiro. A outra razão, e talvez a mais importante delas, é induzir que as partes façam o que é bom para a organização como um todo. Tradicionalmente, são usadas três medidas para se avaliar a “saúde” das empresas: o lucro líquido (medida absoluta), o retorno sobre o investimento (medida relativa) e o fluxo de caixa (condição necessária muito importante à sobrevivência da companhia). Estas, quando julgadas em conjunto, são suficientes para fornecer as informações financeiras necessárias à administração de uma empresa.

O uso destas medidas, porém, é muito útil nos relatórios da alta cúpula administrativa, mas diz muito pouco quando se pretende medir o impacto das ações locais no resultado global do sistema. Assim, a Teoria das Restrições definiu três novos elementos que não apenas auxiliam nas tomadas de decisões da diretoria da empresa, como também nas decisões operacionais locais. São eles, segundo CORRÊA & GIANESI (1994) e GOLDRATT & COX. (1995):

Ganho (*Throughput*): índice pelo qual o sistema gera dinheiro através das vendas.

É importante observar na definição que o ganho só é obtido quando o produto (ou serviço) ofertado é efetivamente vendido. De acordo com GOLDRATT & COX (1995), as três últimas palavras da definição foram colocadas para se evitar uma confusão entre produção e ganho. Se o que foi produzido não for realmente vendido não se obtém ganho.

Inventário (*Inventory*): todo o dinheiro que o sistema investe na compra de coisas que pretende vender.

Aqui, inventário deve ser entendido no seu sentido mais amplo, incluindo máquinas, equipamentos, instalações, construções, materiais, etc.. Esta definição é a mesma do convencional significado de ativo, com exceção ao que se refere ao inventário de material. GOLDRATT & COX (1995) considera que não se deve atribuir valor ao produto conforme este vai sendo manipulado pelo sistema produtivo, uma vez que todo conceito de valor acrescido ao produto faz parte de um distorcido processo de otimização local. O objetivo é acrescentar valor à empresa e não ao produto.

Como bem salienta os autores, o fato de não se levar em conta no cálculo do inventário o valor agregado ao mesmo, não significa que não se tenham estas despesas. Tais gastos, para ele, aparecem na terceira medida denominada Despesa Operacional.

Despesa Operacional (*Operating Expenses*): todo o dinheiro que o sistema gasta transformando Inventário em Ganho.

De acordo com esta definição, qualquer tipo de trabalho, seja ele direto ou não, se enquadraria nesta categoria. Despesa Operacional pode ser entendida, portanto, como todo dinheiro que sai ou é perdido pelo sistema.

Nota-se, portanto, que uma vez contido dentro de um contexto filosófico mais amplo denominado Teoria das Restrições, o método Tambor-Pulmão-Corda não pode ficar desvinculado das medidas de desempenho propostas e da própria definição de restrição.

Antes, no entanto, de explicar o mecanismo TPC, deve-se fazer uma distinção entre dois tipos de denominações de recursos comumente utilizadas: recurso Gargalo e Recurso com Restrição de Capacidade (RRC).

Existem dois tipos de restrições de capacidade. Um tipo é representado pelos gargalos de produção. O outro, e talvez mais importante que o primeiro para fins de sincronização da produção, corresponde aos chamados Recursos com Restrição de Capacidade ou RRCs. Uma definição formal destes dois conceitos pode ser encontrada em notas de aula do curso “Logística de Produção” (CALIA, 1995) ministrado pelo Avraham Y. Goldratt Institute do Brasil, que os expressa da seguinte forma:

Gargalo: qualquer recurso de capacidade menor ou igual à demanda solicitada do mesmo.

Recurso com Restrição de Capacidade: é o recurso que estabelece o máximo fluxo de uma malha produtiva.

Como observação, a mesma publicação define Malha Produtiva como um conjunto de linhas de produção que tem pelo menos uma operação comum.

A Teoria das Restrições propõe uma seqüência coerente de passos que deveria ser seguida por qualquer organização que pretenda adentrar num processo focalizado de aprimoramento contínuo. Este processo, primeiramente descrito por GOLDRATT & COX (1995), foi desenvolvido com o intuito de capacitar as empresas a reconhecerem sistematicamente os elementos do sistema que devem ser aprimorados (as restrições) a fim de se melhorar o desempenho da organização como um todo. A partir daí, tal processo fornece um procedimento simples e intuitivo de focalização constituído por cinco passos para lidar com estes elementos restritivos, denominado de processo decisório da Teoria das Restrições. São estes os cinco passos citados:

1. Identificar a(s) restrição(ões) do sistema.

2. Explorar a(s) restrição(ões) do sistema.
3. Subordinar tudo o mais à decisão anterior.
4. Elevar a(s) restrição(ões) do sistema.
5. Se uma restrição for quebrada nos passos anteriores volte ao passo 1, mas não deixe que a inércia se torne a próxima restrição do sistema.

Quando aplicados a uma situação onde a restrição organizacional está na forma de se gerenciar o processo produtivo, este processo permite um desenvolvimento quase natural do método Tambor-Pulmão-Corda, como apresentado em SOUZA (1997) e reproduzido a seguir.

O primeiro passo, "identificar a(s) restrição(ões) do sistema", implica em encontrar o(s) elemento(s) que limita(m) a *performance* de todo sistema. Tal identificação pode ser realizada através de cálculos de carga-máquina que os produtos da empresa impõem sobre todos os recursos da fábrica, como é feito tradicionalmente. No entanto, este método tem sérios problemas. O principal destes refere-se a integridade das informações disponíveis sobre análise de carga.

Para UMBLE & SRIKANTH (1990), o resultado desta análise é altamente dependente de informações críticas, tais como *mix* de produtos, tempos estimados de *lead times*, processamento e *setup*, e disponibilidade de inventário. Contudo, em quase todas as fábricas, os dados que descrevem estes tipos de informações contêm erros grosseiros. Estes erros são severos o bastante para que os dados não possam ser usados para análise de carga e identificação do RRC. Os autores afirmam, no entanto, que a TOC não exige uma alta precisão dos dados em todo o sistema, mas sim, em alguns pontos estratégicos, como nos recursos candidatos à restrição, por exemplo.

A segunda etapa, "explorar a restrição do sistema", implica em extrair o máximo deste tipo de recurso, impedindo que haja qualquer tipo de desperdício em um RRC, como interrupções por falta de material, problemas com qualidade, quebra ou paradas para troca de turno.

Uma vez que o RRC limita a capacidade produtiva de todo o sistema, este recebe, na terminologia da Teoria das Restrições, o nome de Tambor (*Drum*), pois ele dita a "batida" ou o ritmo de toda a linha de produção. Deve-se salientar que uma fábrica terá tantos RRCs quantas forem as linhas de produção independentes na malha produtiva (GOLDRATT & FOX, 1989). Tambor é, portanto, a programação de atividades do(s) RRC(s), ou seja, a lista de tarefas que deverá ser executada no recurso restritivo de acordo com o total de demanda de trabalho a ser nele processado, com o objetivo final de se atingir o máximo fluxo.

Entretanto, como já mencionado, explorar a restrição significa também impedir que o gargalo pare por falta de material para processar. Desta forma, deve-se criar um Pulmão (*Buffer*) antes do recurso restritivo (RRC) com a finalidade de protegê-lo contra as flutuações estatísticas ou incertezas dos eventos anteriores a ele (GOLDRATT, 1991). Aqui, segundo o autor, flutuação estatística deve ser entendida como a variação no desempenho dos recursos causada por diversos fatores como: duração e frequência de quebra das máquinas, nível de confiabilidade dos equipamentos, índice de rejeição de peças dos recursos, variabilidade no desempenho dos operadores de máquinas, etc. Além do pulmão do RRC deve haver também um pulmão de expedição (ou de mercado) para garantir um bom desempenho quanto à entrega dos pedidos e outro protegendo a operação de montagem das flutuações dos recursos não-restrição que a abastecem.

O Pulmão deve ser expresso na forma de tempo (estoque por tempo de segurança - *time buffer*) e não em quantidade de peças. A vantagem de expressá-lo em termos de unidade de tempo é que, na maioria dos casos, os materiais em estoque estarão sempre mudando, o que dificultaria um bom controle do mesmo. Além disso, é importante ressaltar que estoque só é formado na frente de um recurso quando há liberação de material para a fábrica com um determinado tempo de antecedência em relação ao seu consumo, ou seja, o uso do tempo para expressar a presença física de material na frente de um RRC parece ser perfeitamente aplicável (GOLDRATT, 1991).

Para se chegar a um tamanho adequado para os pulmões de tempo no método TPC, é utilizada uma técnica denominada de Gerenciamento de Pulmão. Há três tipos de resultados que devem ser obtidos a partir do gerenciamento de pulmões segundo SCHRAGENHEIM & RONEN (1991):

1. Sinalização de situações onde os apressamentos são necessários para o cumprimento do programa ou o manuseio da corda está inadequado;
2. Monitoração da duração dos pulmões de tempo;
3. Suporte às decisões gerenciais, indicando onde os esforços de melhoria do sistema devem ser focalizados.

Detalhes adicionais sobre o gerenciamento de pulmão pode ser encontrado em GOLDRATT & FOX (1989), UMBLE & SRIKANTH (1990), GOLDRATT (1991), SCHRAGENHEIM & RONEN (1991), GARDINER *et al.* (1993), HOBBS (1997), RADOVILSKY (1998).

Depois de identificada e explorada a restrição, deve-se seguir o terceiro passo: “subordinar tudo o mais à decisão anterior”. Subordinar implica em fazer com que todos os demais recursos do sistema operem de acordo com o recurso restritivo, nem mais nem menos. Baseado no princípio que “o nível de utilização de um não-gargalo não é determinado por seu próprio potencial, mas sim por alguma outra restrição do sistema” (GOLDRATT, 1991), este passo procura garantir que todos os elementos do sistema operem de acordo com o objetivo global da organização ao invés de buscar otimizações localizadas que não aumentam a produtividade do todo. Eficiências locais que resultam na superativação dos recursos não-RRC não conduzem a empresa na direção de sua meta pois, neste caso, não haveria aumento do ganho (podendo até reduzir-se) enquanto que o inventário, e por consequência a despesa operacional, aumentariam.

Surge, desta feita, um novo conceito proposto pela TOC denominado Corda (*Rope*). Na analogia da Teoria das Restrições, deve existir uma “corda” interligando (“amarrando”) o RRC à primeira operação da malha produtiva, de forma que haja uma sincronização entre estas operações. Assim, material é liberado para a produção de acordo com a taxa de consumo do recurso restritivo, mas com uma antecipação equivalente ao Pulmão de Tempo do RRC. Em outras palavras, matérias-primas só são admitidas no sistema de forma sincronizada (materiais corretos, na quantidade correta e no tempo certo) com a chegada nos estoques protetores dos recursos restritivos (*time buffers*). Isto garante que os estoques em todo o processo produtivo não ultrapassem os níveis do estoque protetor imposto pelo Pulmão de tempo. Na realidade deve haver uma Corda interligando a demanda de mercado ao RRC e outra conectando o RRC à primeira operação da fábrica (ou à liberação de material ao sistema). Ainda haverá uma Corda sincronizando a programação do RRC com a montagem e esta com a liberação de matéria-prima para as operações não-restrição da malha produtiva. Assim, a Corda é um sistema de informação relativamente simples que sincroniza a produção de todos os centros de trabalho da malha produtiva em função do(s) RRC(s) e da demanda de mercado. Como o programa do RRC (Tambor) dita as necessidades de toda a fábrica, o conceito de MPS (*Master Production Scheduling*) passa a ser no TPC o próprio Tambor. Maiores detalhes de como incorporar os conceitos de TPC em programações tipo MRP podem ser encontradas em SPENCER (1991), SPENCER & COX (1995a) e SPENCER & COX (1995c).

O conceito de Corda pressupõe que os demais recursos da fábrica têm capacidade suficiente de atender às necessidades da restrição, ou seja, a questão aqui é saber se os demais recursos da malha produtiva têm condições de seguir o ritmo do Tambor sem consumir a

proteção estabelecida pelo Pulmão. Antes disso, no entanto, é interessante discutir o conceito de capacidade protetora para a TOC.

Um dos pressupostos básicos da Teoria das Restrições é que qualquer sistema que possua variáveis dependentes sujeitas a flutuações estatísticas, não deverá ter mais que uma restrição interna, pois se um material percorre a empresa passando por mais que uma restrição interna, o ganho desejado não será alcançado e o inventário subirá indefinidamente. Este seria o caso, por exemplo, das linhas balanceadas (GOLDRATT & COX, 1995).

GOLDRATT (1991) afirma que se deve evitar ao máximo as restrições interativas (ou restrições secundárias), isto é, todos os recursos não restritivos devem ter mais capacidade do que está estritamente prevista pela carga esperada. Assim, se o objetivo é explorar restrição, deve-se ter algum inventário antes dela para proteger o ganho. Entretanto, quando ocorre alguma interrupção no fluxo de material para a restrição, esta consome parte do inventário colocado a sua disposição e, se tal interrupção voltar a ocorrer, a restrição poderá ficar exposta.

Torna-se vital, portanto, que o inventário colocado na frente da restrição seja reconstruído antes que uma nova interrupção venha a acontecer. Mas para isto, segundo GOLDRATT (1991), todos os recursos não-restritivos devem ser capazes de processar material mais rapidamente que o estritamente pedido pelo índice de consumo da restrição. Ainda para GOLDRATT (1991), uma vez que os recursos restritivos não possuem qualquer capacidade protetora interna, estes devem ficar protegidos pela combinação do estoque colocado antes deles e pela capacidade protetora dos recursos que os abastecem. Existe uma compensação entre estes dois mecanismos de proteção. Menos capacidade protetora nos recursos de abastecimento exigirá níveis mais altos de inventário à disposição da restrição.

Desta forma, no exame da capacidade disponível, deve-se distinguir entre três, e não dois, segmentos de capacidade conceitual. O primeiro é a **capacidade produtiva**, o segmento necessário para a produção, a fim de atender à demanda. O segundo segmento é a **capacidade protetora**, necessária como um escudo contra as variabilidades do sistema. Apenas o recurso restritivo não possui capacidade protetora, pois este deve ser explorado. Qualquer capacidade remanescente, após levar-se em conta as capacidades produtiva e protetora, será considerada **excesso de capacidade**.

Assim, qualquer decisão referente a redução de capacidade de um recurso produtivo ou mesmo a introdução de um novo produto na malha produtiva deve estar fundamentada nestes conceitos, a fim de se evitar a venda da capacidade protetora dos recursos e o surgimento, por consequência, de restrições iterativas (também chamadas de restrições flutuantes).

Deve-se salientar que o método Tambor-Pulmão-Corda (TPC) permite que se obtenha a programação (no caso implícita) de todos os recursos não gargalos da empresa. Aqueles situados antes da restrição deverão processar o mais rápido possível os materiais recebidos pela primeira operação, de acordo com a ordem de chegada destes. Uma vez que, por definição, tais recursos possuem excesso de capacidade em relação ao RRC, eles não terão nenhuma dificuldade para seguir o programa. Da mesma forma, os recursos não-restritivos localizados no roteiro de produção após o RRC estarão diretamente sob o controle deste, pois estes receberão apenas as peças liberadas pelo RRC. Como tais recursos têm, por definição, folga no programa, não haverá nenhum problema também neste ponto. Logo, ordens de produção explícitas são necessárias apenas em alguns pontos específicos, como nos RRCs e nos locais de liberação de material para a fábrica, por exemplo.

Em resumo, a maneira TPC reconhece que existem apenas alguns poucos recursos com restrição de capacidade (RRCs), que irão impor o índice de produção da fábrica inteira (Tambor). Para garantir que a produção deste recurso não seja interrompida por falta de peça cria-se na frente dele um inventário que protegerá o ganho das vendas da fábrica contra a maioria das interrupções que possam ocorrer dentro de um intervalo pré-determinado de tempo (Pulmão de Tempo). Com o objetivo de impedir que haja um aumento desnecessário nos níveis de estoque em processo, material é liberado para a fábrica no mesmo ritmo com que o recurso restritivo o consome (Corda), mas com uma defasagem no tempo equivalente ao pulmão de tempo estabelecido. SCHRAGENHEIM & RONEN (1990) discutem e exemplificam a aplicação da metodologia TPC.

A figura 2.5 procura ilustrar o mecanismo de sincronização proposto pelo método TPC. Nota-se na figura os programas dos RRCs (tambores), as posições dos pulmões de tempo e os cálculos de liberação de material para a fábrica.

Segundo RUSSELL & FRY (1997), há até o momento pouca pesquisa relativa ao sistema de controle e planejamento denominado Tambor-Pulmão-Corda (TPC), o que dificulta sua aceitação como uma ferramenta viável. Para os autores esta metodologia de planejamento e controle da produção carece de mais estudos referentes à identificação de políticas e procedimentos apropriados à programação e operação do TPC.

Do que foi dito até aqui sobre o mecanismo de funcionamento do método Tambor-Pulmão-Corda (TPC) da Teoria das Restrições (TOC), pode ser dado o nome “TPC manual”. Tal nome advém do fato que os conceitos até então desenvolvidos servem bem a situações onde as restrições são estáveis, variando pouco em termos de mudanças de *mix* de produção, fazendo

com que a aplicação daqueles conceitos sejam mais simples de implementar e minimizando a necessidade do uso de sistemas computacionais mais sofisticados para manipulá-los.

FIGURA 2.5: O método Tambor-Pulmão-Corda, baseada em SOUZA (1997).

A maioria dos ambientes produtivos, no entanto, a não ser que certas medidas sejam tomadas com o objetivo de adaptá-los, não reflete aquela situação ideal e o uso do TPC torna-se mais complexo, necessitando de ferramentas computacionais e conceituais adicionais para que seu uso seja mais efetivo. Mais detalhes sobre os mecanismos de programação adotados pelo TPC podem ser encontrados em GOLDRATT (1991) e STEIN (1997). O uso de um conceito denominado “hastes”, para se lidar com situações de restrições interativas, presentes quando há mais de um RRC a ser considerado na programação, pode ser encontrado em GOLDRATT (1991) e SIMONS *et al.* (1996).

Apresentados os três sistemas de planejamento e controle da produção que, ao lado do procedimento aqui denominado de *Reorder Point* (ROP), serão alvos desta pesquisa, o tópico

seguinte apresenta um trabalho bastante interessante que compara alguns sistemas de PCP vinculados a alguns métodos de alocação de capacidade. Pela sua relevância em relação a esta pesquisa e ainda pelo fato de ter sido o trabalho que mais se aproximou do objetivo desta tese, foi considerado interessante uma breve apresentação e discussão do mesmo.

2.2.4 Comparações entre sistemas de gestão da produção e suas respectivas abordagens de projeto de linhas

CHAKRAVORTY & ATWATER (1996) realizaram estudo comparando três sistemas de gestão da produção, denominados pelos autores de filosofias operacionais, cada qual com uma abordagem de projeto de linha própria. Foram pesquisados um sistema baseado em linha balanceada, o sistema *just in time* e o método Tambor-Pulmão-Corda da TOC. Como a cada sistema de gestão estava associada uma maneira específica de se projetar uma linha, as comparações ficaram restritas aos que os autores chamaram de linha balanceada, linha JIT e linha TOC. A variável de interesse à pesquisa é a taxa de produção das linhas, o que os autores chamaram de *output rates*.

Segundo os modelos desenvolvidos, cada linha está sujeita a dois níveis de variações nos tempos médios de paradas nas estações de trabalho e a dois níveis de variabilidade nos tempos de processamento. Outro parâmetro do modelo está relacionado aos níveis máximos de estoque em processo permitidos nas linhas, os quais compreenderão oito níveis possíveis. Desta forma os autores procuram detectar o impacto que variações nos tempos de parada, nos tempos de processamento e nos níveis de WIP têm no desempenho de cada linha. Todas as linhas foram projetadas de modo que a soma dos tempos de processamento fosse constante em 40 minutos com tempo de processamento de dez minutos sob condições ideais. Cada linha foi modelada como um sistema fechado, mantendo-se constante o nível de inventário em todos os modelos.

As linhas balanceadas foram modeladas com quatro operações de dez minutos, figura 2.6. Cada estação permite que se acumule todo o estoque do sistema, evitando que se ocorram bloqueios entre as estações. Assim, materiais podem fluir livremente por todo o sistema durante a simulação.

FIGURA 2.6: Linha Balanceada. Baseada em CHAKRAVORTY & ATWATER (1996)

As linhas JIT foram projetadas com cinco operações de oito minutos e uma estação fantasma, que representa a demanda de mercado, no final da linha que puxa material ou produto acabado (se disponível) a cada dez minutos, figura 2.7. Desta forma a linha é balanceada com cada estação tendo uma folga de 20% de capacidade. Os estoques são divididos igualmente em frente às estações dois a cinco e na forma de produtos acabados. Na realidade, cada estação pode manter, no máximo, um quinto do total de estoque do sistema, bloqueando a produção caso o nível máximo seja atingido.

FIGURA 2.7: Linha *Just in Time*. Baseada em CHAKRAVORTY & ATWATER (1996)

As linhas TOC foram projetadas com seis estações, sendo que as primeiras cinco possuem um tempo médio de processamento de seis minutos e a última estação tem um tempo médio de dez minutos, figura 2.8. A escolha para este perfil de capacidades foi, segundo os autores, arbitrária, forçando um tempo médio total de processamento de 40 minutos e com uma estação gargalo no último posto da linha com tempo de processamento médio de 10 minutos. Cada estação foi modelada de modo a permitir manter todo o estoque do sistema, se necessário, ou seja, assim como na linha balanceada, materiais podem fluir livremente na linha TOC.

FIGURA 2.8: Linha Teoria das Restrições. Baseada em CHAKRAVORTY & ATWATER (1996)

Depois de simulados os modelos, os autores puderam chegar a algumas conclusões, que abaixo estão relacionadas.

a) Impactos relacionados à variabilidade do coeficiente de variação (CV) dos tempos de processamento:

- Linhas balanceadas têm desempenho inferior às linhas JIT e TOC sob quaisquer níveis de CV;
- Linhas JIT são mais eficientes quando o CV é baixo;
- Linhas JIT e TOC têm desempenho semelhante a um nível de 50% de CV;
- Linhas TOC são mais eficientes quando o CV está acima de 50%;
- Linhas balanceadas e JIT são mais sensíveis a variações no CV do que as linhas TOC.

b) Impactos relacionados ao nível médio de paradas (*downtime* - DT) das estações:

- Para um índice de DT igual a 10%, o desempenho de linhas JIT supera as linhas TOC, que por sua vez é superior às linhas balanceadas;
- Para um índice de DT igual a 30%, linhas TOC superam tanto as linhas JIT quanto as linhas balanceadas, que se igualam neste nível de DT;
- Linhas TOC são melhores para níveis de DT altos, enquanto linhas JIT são melhores para níveis de DT baixos.
- Todas as linhas são sensíveis a variações nos índices de DT;
- As linhas JIT são as mais afetadas pelas variações no DT.

c) Impactos relacionados ao nível de inventário

- Linhas TOC superam as linhas JIT e balanceada quando os níveis de estoque no sistema são relativamente baixos (até 30 unidades);

- Linhas balanceadas superam as linhas JIT quando os níveis de estoque estão em 10 ou 20 unidades;
- Linhas TOC alcançam seu máximo desempenho com níveis muito mais baixos de estoque no sistema que as linhas JIT;
- Linhas JIT superam as linhas TOC e balanceada com níveis de estoque acima de 40 unidades.

Este autor faz, no entanto, algumas ressalvas sobre os resultados ou conclusões obtidas na pesquisa de CHAKRAVORTY & ATWATER (1996). Primeiramente, as comparações foram realizadas em cima de linhas com características distintas tanto em termos de programação (ou controle) quanto em termos de distribuição de capacidades entre as estações de trabalho. Além disso, variou-se também, simultaneamente nos modelos, o número de estações de trabalho permitidas na linha. Considera-se aqui que, ao se variar estas três variáveis simultaneamente, fica difícil saber qual destas variáveis, se não todas em conjunto, foi responsável pelos resultados alcançados.

Sabe-se, por exemplo, que o número de estações de trabalho tem relação inversa com o nível de *output* da linha. Neste caso, as linhas balanceadas, por terem apenas quatro recursos, teriam um desempenho superior às demais linhas. No entanto, as linhas JIT e TOC possuem estações de trabalho com tempos de processamento inferiores a 10 minutos, o que poderia possibilitar-lhes um desempenho superior à linha balanceada. De qualquer forma, pelo fato dos autores buscarem, num mesmo modelo, incorporar características tanto de sistemas de controle quanto de projeto da fábrica, sem um isolamento das variáveis dos modelos, fica difícil avaliar qual fator mais prevaleceu no desempenho obtido.

Baseado nas revisões bibliográficas realizadas e com o objetivo de sintetizar algumas características dos três sistemas de programação e controle da produção selecionados para pesquisa, foi construída a tabela 2.1 onde se possa relacionar algumas situações de ambientes de produção com as aplicabilidades permitidas em cada sistema.

TABELA 2.1: características de aplicabilidade dos sistemas Kanban, CONWIP e TPC

	Kanban	CONWIP	TPC
Estratégia de produção (para estoque ou por encomenda)	Funciona melhor em ambientes que trabalham de forma seriada, produzindo para estoque.	Desempenho do sistema independe do tipo de estratégia adotada, pois a lista de tarefas esperando para serem liberadas podem ser elaboradas tanto em função de pedidos firmes quanto de previsões de vendas.	Desempenho do sistema independe do tipo de estratégia adotada, pois o tambor pode ser formulado em função de previsões ou pedidos firmes.
Mix de produtos	Deve ser reduzido via política de mercado ou uso de técnicas do tipo tecnologia de grupo para se evitar altos níveis de estoque no sistema.	Não altera a quantidade de estoque que deve ser mantida no sistema.	Não altera a quantidade de estoque que deve ser mantida no sistema.
Variabilidade da demanda	Altamente prejudicial ao sistema.	Não restringe a aplicabilidade do método.	Pode tornar-se um problema se levar a situação onde a restrição muda muito de lugar; o uso de um software gerenciador tipo OPT pode ajudar nestas situações.
Variabilidade dos processos e/ou recursos	Não suporta ambientes caracterizados por recursos cuja capacidade flutua muito no tempo.	Alta variabilidade não impede a implementação do método, apenas definirá o nível de estoque em processo que será utilizado.	Alta variabilidade não impede a implementação do método, apenas definirá os níveis de pulmão de tempo a serem utilizados para garantir a exploração da restrição.

TABELA 2.1 (continuação): características de aplicabilidade dos sistemas Kanban, CONWIP e TPC

Fluxo de materiais	Funciona bem apenas em ambientes tipo <i>flow-shop</i> .	Funciona bem apenas em ambientes tipo <i>flow-shop</i> .	Não possui restrição quanto ao fluxo de material; em ambientes complexos tipo <i>job-shop</i> o uso de um sistema gerenciador tipo OPT é fundamental.
Critério de distribuição de cargas ou capacidades	Busca-se formas de se alcançar um balanceamento da linha.	Desempenho independente dos níveis de balanceamento dos recursos.	Desbalanceamento é fundamental para o bom funcionamento do sistema.
Exploração da restrição	Não há uma preocupação explícita	Exploração permitida via acúmulo natural de estoque antes da restrição e/ou utilização de um mecanismo de liberação de material em função da taxa de produção da restrição e/ou sequenciamento de tarefas em função de economias de <i>setups</i> na restrição.	É um pressuposto fundamental do TPC alcançado através da elaboração do Tambor e da criação de Pulmões de Tempo estrategicamente posicionados.
Mecanismos de controle	Limita via cartões os níveis máximos de estoques permitidos entre cada recurso produtivo e mede-se o <i>throughput</i> .	Limita via cartões o nível máximo de estoque permitido em todo o sistema e mede-se o <i>throughput</i> .	A partir de um programa mestre estabelecido na restrição (tambor) limita-se a Quantidade de estoque em processo via pulmão de tempo e controle de liberação de material (corda).

O capítulo seguinte discute as hipóteses simplificadoras que os modelos para simulação se basearam. Cada parâmetro do modelo é detalhado de modo que o domínio de aplicação se torne claro. Tanto as variáveis relacionadas à definição do ambiente de manufatura, quanta àquelas que definem o critério de alocação de capacidades adotado e o método de PCP aplicado, são alvo de discussão neste capítulo.

3. PLANEJAMENTO DO ESTUDO COMPARATIVO

Objetiva-se aqui discutir e apresentar todos os parâmetros e hipóteses dos modelos elaborados para simulação. Primeiramente serão discutidos diversos aspectos presentes no domínio de aplicação selecionado para a pesquisa, quando se abordará tópicos referentes ao tipo de arranjo físico dos recursos, número de recursos, tempos de processamento, distribuição de estoques, mecanismos de bloqueio, entre outros. Em seguida, são apresentadas as diversas combinações entre parâmetros e variáveis que resultaram nos diversos modelos que serão simulados. Uma explicação sobre como entender as nomenclaturas dos modelos também é apresentada. Por fim, segue-se um tópico referente à modelagem dos sistemas de PCP, quando são discutidos detalhes principalmente relacionados à forma como fluxo de materiais é controlado nos diversos sistemas e as hipóteses relacionadas.

3.1. Definição do domínio de aplicação

Uma vez que é intenção desta pesquisa estudar o desempenho de quatro sistemas de administração da produção – Kanban tradicional, CONWIP (*Constant Work-In-Process*), Tambor-Pulmão-Corda e *Reorder Point*, sob diversas formas de distribuição de cargas de trabalho entre os elementos produtivos, foi considerado mais adequado para fins de análise um arranjo físico por produto que proporcionasse um fluxo linear de materiais pela fábrica segundo um sistema produtivo baseado em lotes de produção unitários. A configuração linear deste tipo de arranjo facilita a alocação de cargas segundo os critérios desejados. O ambiente selecionado deve, portanto, ser constituído por alguns recursos em linha, produzindo produtos discretos e exigindo uma mesma sequência de processamento (produção do tipo *flow-shop*).

3.2. Obtenção de um modelo de ambiente produtivo

Com a finalidade de representar o domínio de aplicação anteriormente definido, é aqui proposto um modelo de ambiente produtivo cujo nível de complexidade permita que se aproxime de situações práticas reais e ainda possibilite um tratamento científico para obtenção de conclusões válidas. Desta maneira, os modelos a serem desenvolvidos se caracterizarão por:

a) *Número de recursos*: o modelo deverá conter cinco estações de trabalho. CONWAY *et al.* (1988) citam que a perda de capacidade ocorre nas primeiras 5 máquinas e que adicionais máquinas causam pouca perda adicional na capacidade da linha. Desta maneira, cinco máquinas (ou recursos) parecem ser uma quantidade suficiente para se analisar o impacto no *throughput* da linha.

b) *Tempos de processamento*: os tempos de processamento irão, de fato, estabelecer a forma de distribuição de carga selecionada para a pesquisa. A escolha dos tempos de processamento irá, portanto, fornecer os oito tipos de configuração de distribuição de carga que serão estudadas (balanceada, *bowl*, tigela invertida ou “V”, linear crescente, linear decrescente, alternada, em passo ou *step* e segmentada). Além disso, com exceção da configuração balanceada, cada uma das demais configurações deve possuir três formatos distintos, cada qual representando o grau de desbalanceamento da configuração. A figura 3.1 a seguir ilustra esta situação, com a configuração em “V” como exemplo. Nota-se que, em cada um dos três formatos, a somatória dos tempos de processamento dos recursos deve ser sempre a mesma. Mais detalhes de como foram calculados os valores para os tempos de processamento de cada configuração de alocação de capacidade estão no tópico “Grau de Desbalanceamento”, a seguir.

FIGURA 3.1: Três formatos distintos para a configuração em “V”

Todas as linhas deverão ter o mesmo tempo de processamento total, ou seja, a soma dos tempos de processamento de cada recurso em todas as linhas deverá ser sempre mantida constante. Foi estabelecido que toda linha terá, como tempo total de processamento de produtos, o valor de cinco unidades de tempo. Isto equivale a dizer que, em média, os tempos individuais de processamento de cada recurso são de uma (1) unidade de tempo (já que as linhas são constituídas por cinco recursos). Desta maneira, uma linha balanceada terá todos os seus cinco

recursos processando peças com um tempo de processamento de uma (1) unidade de tempo em média. Isto também equivale a dizer que, se todos os tempos fossem determinísticos, uma linha balanceada produziria uma peça por unidade de tempo.

As linhas desbalanceadas, entretanto, terão alguns recursos com tempos médios de processamento superiores a uma unidade de tempo e outros recursos com tempos médios de processamento inferiores a uma unidade de tempo. No entanto, é importante ressaltar que a soma dos tempos individuais se mantenha sempre constante e igual a cinco unidades de tempo, sempre em média.

c) Grau de Desbalanceamento (GD): como já dito, três graus de desbalanceamento foram adotados para a pesquisa, onde $GD_{(alt)}$ corresponde ao nível mais alto de desbalanceamento, $GD_{(méd)}$ um nível médio de desbalanceamento, enquanto que $GD_{(bco)}$ reflete linhas menos desbalanceadas. Para escolha dos valores dos tempos de processamento que pudessem proporcionar os três níveis de desbalanceamento sugeridos, foi utilizada uma abordagem fundamentada no trabalho de HILLIER & SO (1993). Em HILLIER & SO (1993), pode-se encontrar algum *insight* para um arranjo que se aproxime do ótimo na alocação de cargas segundo a forma *Bowl*. Uma vez calculados os tempos médios de processamento de cada recurso na distribuição *Bowl* para os três níveis de desbalanceamento, esses serviram de base para o cálculo de todos os demais tempos médios de processamento para todas as demais formas de alocação de capacidades com suas respectivas intensidades de desbalanceamento. A tabela 3.1 apresenta todos os tempos de processamento calculados.

Entende-se aqui por linhas com igual intensidade de desbalanceamento aquelas cuja a somatória da variação em torno do valor 1 são iguais. Matematicamente, pode-se dizer que o grau de desbalanceamento de um modelo A é igual ao modelo B se,

$$GD_A = \sum_A (|T_i - 1|) = \sum_B (|T_i - 1|) = GD_B$$

Onde T_i é o valor do tempo de processamento do recurso i

Por exemplo, ao se comparar os graus de desbalanceamento dos modelos *Linear Crescente* com o modelo tipo alternado, ambos com grau de desbalanceamento médio (ver tabela 3.1), observa-se que estes possuem o mesmo grau de desbalanceamento, pois:

Modelo *Linear Crescente*:

$$GD_{(méd)} = |1,133 - 1| + |1,067 - 1| + |1,000 - 1| + |0,933 - 1| + |0,867 - 1| = 0,4$$

Modelo Alternado:

$$GD_{(méd)} = |0,900 - 1| + |1,100 - 1| + |0,900 - 1| + |1,100 - 1| = 0,4$$

Se efetuados os cálculos para $GD_{(alt)}$ e $GD_{(bxo)}$, para todos os modelos (segundo os valores da tabela 3.1), obtém-se os seguintes valores:

$$GD_{(alt)} = 0,704$$

$$GD_{(bxo)} = 0,1$$

TABELA 3.1: Tempos médios de processamento propostos para pesquisa

Configuração (forma)	Recurso 1	Recurso 2	Recurso 3	Recurso 4	Recurso 5
Balanceado	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
Bowl $GD_{(alt)}$	1.176	0.890	0.868	0.890	1.176
Bowl $GD_{(méd)}$	1.100	0.938	0.924	0.938	1.100
Bowl $GD_{(bxo)}$	1.025	0.985	0.980	0.985	1.025
V $GD_{(alt)}$	0.824	1.102	1.148	1.102	0.824
V $GD_{(méd)}$	0.900	1.059	1.082	1.059	0.900
V $GD_{(bxo)}$	0.975	1.015	1.020	1.015	0.975
Linear cresc. $GD_{(alt)}$	1.235	1.117	1.000	0.883	0.765
Linear cresc. $GD_{(méd)}$	1.133	1.067	1.000	0.933	0.867
Linear cresc. $GD_{(bxo)}$	1.033	1.017	1.000	0.983	0.967
Linear decresc. $GD_{(alt)}$	0.765	0.883	1.000	1.117	1.235
Linear decresc. $GD_{(méd)}$	0.867	0.933	1.000	1.067	1.133
Linear decresc. $GD_{(bxo)}$	0.967	0.983	1.000	1.017	1.033
Segmentado $GD_{(alt)}$	1.044	0.824	1.264	1.044	0.824
Segmentado $GD_{(méd)}$	1.025	0.900	1.150	1.025	0.900
Segmentado $GD_{(bxo)}$	1.006	0.975	1.038	1.006	0.975
Step $GD_{(alt)}$	1.352	0.912	0.912	0.912	0.912
Step $GD_{(méd)}$	1.200	0.950	0.950	0.950	0.950
Step $GD_{(bxo)}$	1.050	0.9875	0.9875	0.9875	0.9875
Alternada $GD_{(alt)}$	0.824	1.176	0.824	1.176	1.000
Alternada $GD_{(méd)}$	0.900	1.100	0.900	1.100	1.000
Alternada $GD_{(bxo)}$	0.975	1.025	0.975	1.025	1.000

Ao se garantir níveis similares de intensidade de desbalanceamento entre os modelos, pode-se agora efetuar as comparações entre desempenhos de linhas semelhantes, já que a variável “intensidade de desbalanceamento” passa a ser constante para todos os modelos. Deve-se frisar que as linhas balanceadas possuem GD igual a zero. A figura 3.2 a seguir ilustra as oito configurações pesquisadas.

FIGURA 3.2: Ilustração das oito configurações de alocações de tempos de processamento

d) *Flutuações estatísticas dos tempos de processamento*: estas devem refletir um valor que corresponda à soma agregada de todos os fatores que contribuem para as variações nos tempos de processamento como: frequência de quebras, variações no tempo de reparo, restabelecimento dos padrões de qualidade, além da própria variabilidade intrínseca a qualquer operação.

O parâmetro geralmente utilizado para representar estas variabilidades é o Coeficiente de Variação (CV), o qual é definido como o valor médio de uma determinada variável dividido pelo seu desvio padrão (ver, por exemplo, HOPP & SPEARMAN, 1996). Matematicamente, o CV é representado por:

$$CV = \mu / \sigma.$$

Onde μ é a média da variável em estudo e σ o desvio padrão desta variável. No caso do estudo de tempos de processamento, μ é a média dos tempos de processamento de um determinado recurso ao longo de um período de simulação, enquanto que σ é o desvio padrão destes tempos de processamento em torno da média.

Ao se determinar um valor alvo para o CV, deve-se identificar qual distribuição estatística permite que este valor seja alcançado. As distribuições exponenciais, por exemplo, fornecem sempre um $CV = 1$, ou seja, o desvio padrão para este tipo de distribuição de números aleatórios é sempre igual a seu valor médio, uma variabilidade considerada até certo ponto alta para situações reais.

A distribuição triangular (para se evitar valores negativos) foi escolhida como forma de representar dois níveis de flutuações ($CV = 0,2$ e $CV = 0,5$) nos tempos de processamento dos recursos do modelo. Considera-se aqui que a distribuição triangular pode representar de maneira razoável as reais variações nos tempos de execução de tarefas em linhas de produção, principalmente se comparada à distribuição exponencial, muito utilizada em pesquisas nesta área, mas cuja variabilidade é considerada excessiva para a maioria dos casos práticos (HOPP & SPEARMAN (1996), SMUNT & PERKINS, (1985), PIKE & MARTIN (1994)). Entretanto, a distribuição exponencial foi aqui mantida para representar o terceiro nível de variabilidade ($CV = 1,0$), justamente por estar presente em grande número de pesquisas relacionadas a desempenho de linhas de manufatura.

e) *Demanda*: o modelo representa um *mix* de produção de um único item com demanda infinita, ou seja, tudo o que é produzido é vendido. Tal situação evita que a produção do último recurso da linha seja bloqueada por ausência de demanda.

f) *Estrutura do Produto ou Bill of Material*: A estrutura do produto é linear, não havendo operações de montagem.

g) *Layout*: planta fabril com recursos dispostos em linha, como já mencionado;

h) *Matéria-prima*: a disponibilidade de matéria-prima é ilimitada, o que garante que o primeiro recurso da linha terá sempre material para processar. Tanto a presença de disponibilidade ilimitada de matéria-prima quanto da demanda infinita possibilitam que o desempenho da linha não seja afetado por fatores externos a ela.

i) *Mecanismos de bloqueio*: um recurso só não estará em operação se uma das duas condições estiver ocorrendo: 1) o recurso não tem material para processar (isto nunca acontece com o primeiro recurso da linha devido à disponibilidade ilimitada de matéria-prima) e; 2) o recurso é bloqueado por indisponibilidade de espaço de estocagem e/ou ausência de autorização para produção (isto nunca acontece com o último recurso da linha devido à presença de uma demanda infinita por produtos acabados e espaço ilimitado para armazenagem).

j) *Estoques*: os estoques deverão ser distribuídos segundo os critérios presentes nos sistemas de PCP considerados, que são:

- Kanban: em estudos sobre a ótima alocação de estoques em linhas de produção controladas por kanban, TAYUR (1993), MUCKSTADT & TAYUR (1995a) e MUCKSTADT & TAYUR (1995b), observaram que sob a hipótese de infinita disponibilidade de matéria-prima e demanda também infinita, a alocação de cartões kanbans (cada cartão representando uma peça) que proporciona a maior taxa de produção de uma linha de manufatura deve ter um cartão em cada um dos recursos localizados nos dois extremos da linha (recurso 1 e 5, no caso desta pesquisa). Isto se deve ao fato, segundo os autores, que os cartões kanban, em um determinado recurso da linha, são capazes de fornecer proteção tanto aos recursos posteriores quanto aos anteriores a ele em momentos diferentes. De fato, sendo C_k a quantidade máxima de cartões no recurso k , C_{k+1} a quantidade de cartões no recurso posterior $k+1$ e C_{k-1} a quantidade máxima de cartões no recurso anterior $k-1$, a quantidade máxima possível de estoque imediatamente após o recurso k é $C_k + C_{k+1}$ e a máxima quantidade de estoque de material antes do recurso k é $C_k + C_{k-1}$ (a mínima quantidade de estoque antes e depois do recurso k é zero). Estes máximos ocorrem em momentos diferentes, de modo que em determinado momento um cartão referente ao recurso k pode estar alocado a uma unidade de estoque entre os recursos $k-1$ e k , entre os recursos k e $k+1$, mas nunca em ambos. Como o primeiro recurso de uma linha não necessita fornecer proteção antes dele, assim como o último recurso não necessita proteger nada após ele, a tais recursos são

alocados apenas um cartão. A figura 3.3 a seguir ilustra o mecanismo acima explicado. Segundo a figura, o supermercado (*output hopper*) é o local onde ficam armazenados os lotes de peça já processados pelo recurso e que aguardam o momento para ser transportados para a célula seguinte. O quadro de kanbans (*bulletin board*), por sua vez, é local onde ficam postados os cartões kanban que autorizam a retirada de material do recurso precedente.

A: Quadro de kanbans (*Bulletin Board*) do recurso K

B: Supermercado (*Output Hopper*) do recurso K

D: Cartão viajando do supermercado para o quadro de kanbans

E: Peça transferida do recurso K para o recurso $K+1$

FIGURA 3.3: Esquema ilustrativo de funcionamento do sistema Kanban adotado. Adaptado de TAYUR (1993)

Seguindo os corolários apresentados em TAYUR (1993), para os cinco níveis máximos de estoques sugeridos, as seguintes configurações de distribuição de cartões proporcionariam máxima performance:

5 cartões: 1-1-1-1-1

7 cartões: 1-2-1-2-1

9 cartões: 1-2-2-3-1

13 cartões: 1-4-3-4-1

17 cartões: 1-5-4-6-1

Uma importante observação deve ser feita neste ponto. As configurações de distribuição de cartões Kanban mencionadas são ótimas, segundo TAYUR (1993), apenas para linhas balanceadas. O autor menciona ainda que tais configurações não variam segundo as variabilidades (CV) dos tempos médios de processamento. No entanto, linhas não balanceadas podem possuir configurações distintas. Nesta tese, entretanto, foram testados sistemas Kanbans

com alocações de cartões supondo-se sempre linhas balanceadas, ou seja, as formas de distribuição de cartões entre recursos variaram apenas devido aos diversos níveis de WIP máximos e não segundo as diversas formas de alocação de capacidades.

- CONWIP: aqui a alocação de cartões é estabelecida para toda a linha, não sendo, portanto estabelecidos níveis de estoque para cada recurso, e sim para a linha como um todo. Apesar de o CONWIP permitir um controle diferenciado de produção quando existem gargalos regulares na linha, tal controle será aqui exibido pelo método TPC, a seguir.

- TPC: fica determinado um nível máximo de WIP antes do recurso restritivo, ficando liberada a quantidade de material após ele. Serão estabelecidos diversos níveis *máximos* de WIP antes do RRC. Para cada um destes níveis, mede-se o nível *médio* de WIP em toda a linha, permitindo que se faça, oportunamente, comparações com os demais sistemas de gestão da produção. Deve-se notar que, uma vez que a demanda é infinita, tem-se aqui o caso do RRC ser sempre um gargalo. Sendo assim, segundo os pressupostos do método Tambor-Pulmão-Corda da Teoria das restrições, este recurso gargalo deve produzir o tempo todo, sem nenhuma forma de bloqueio relacionado a limitações de WIP. Logo, não faz sentido no modelo TPC falar-se em quantidades *máximas* de WIP no sistema, já que não há limitação de estoques após o gargalo. Apenas a medida WIP *médio* do sistema faz sentido neste modelo.

- ROP: assim como no sistema Kanban, o ROP exige que se determine o espaço ou a quantidade de estoque permitida entre cada recurso de produção. No entanto, a quantidade ótima de capacidade de estocagem não corresponde à mesma disposição encontrada para o Kanban. Isto se deve ao fato que as linhas controladas segundo o método ROP, ao contrário dos sistemas tipo Kanban, não ajustam dinamicamente as proteções nos recursos da linha. No ROP, não há cartões circulando entre os recursos da linha, mas sim uma capacidade limitada de estocagem (limitação de espaço, por exemplo) entre cada recurso. Tal característica confere aos sistemas ROP uma alocação diferenciada de capacidades de estocagem quando se busca uma configuração ótima em termos de taxa de produção. EL-RAYAH (1979b) constatou, para linhas controladas segundo a abordagem ROP, que a mais eficiente e consistente forma de se projetar uma linha em termos de maximização da taxa de produção é onde iguais quantidades de capacidades de proteção são alocadas a todos os recursos da linha. Assim, para cada nível máximo de estoque em processo

permitido na linha ter-se-á a seguinte configuração de capacidades de estocagem distribuídas entre cada recurso:

WIP igual a 5: 1-1-1-1

WIP igual a 7: 1-2-2-1

WIP igual a 9: 2-2-2-2

WIP igual a 13: 3-3-3-3

WIP igual a 17: 4-4-4-4

Ao se observar as capacidades de estocagem acima, verifica-se que a soma é sempre uma unidade abaixo do total estabelecido. Isto se deve ao fato que o limite de estocagem é definido pela capacidade do recurso (o qual processa uma peça por vez) mais o espaço de estocagem que o sucede (ver modelagem do sistema ROP a seguir, figura 3.4). Como não há limitação de estoques para o último recurso da linha (tudo o que este produz é imediatamente consumido pela demanda), a este não é atribuído nenhum valor. No entanto, deve-se lembrar que o último recurso pode manter uma peça em processamento, o que lhe confere sempre um limite de estocagem de uma peça. Assim, deve-se sempre somar uma peça à configuração acima definida.

Por fim, as simulações aqui efetuadas deverão estar calcadas na análise da variável *throughput* (ou volume de produção) em função de algum nível de estoque em processo. Em outras palavras, pretende-se estudar sob diversos níveis de estoque de material em processo e três níveis de coeficiente de variabilidade dos tempos de processamento, qual o volume de produção encontrado em cada uma das possíveis combinações de “configurações de distribuição de capacidades” x “sistemas de gestão”. Em seguida apresentam-se todas as possíveis combinações dos modelos elaborados e a legenda usada para identificar cada tipo de modelo.

3.3. Total de modelos utilizados na pesquisa

Cada um dos modelos é caracterizado pelos diversos parâmetros ou variáveis da pesquisa, ou seja, ele deve implicar num sistema de planejamento e controle da produção (PCP), um nível máximo de WIP, um coeficiente de variabilidade (CV) e um critério de alocação de capacidades produtivas entre recursos da linha. A seguinte nomenclatura foi desenvolvida, a qual define todos os parâmetros do modelo.

Tipo de PCP:

- C: CONWIP

- K: Kanban
- R: *Reorder Point*
- T: Tambor-Pulmão-Corda

Nível máximo de WIP:

- 5, 7, 9, 13 ou 17

Critério de alocação de capacidades:

- BAL: balanceado
- BWL: *bowl*
- LC: linear crescente
- LD: linear decrescente
- MIX: alternado
- SEG: segmentado
- STP: *step*
- V: em “V”

Coefficiente de variabilidade (CV):

- 1,0: identificado por 1
- 0,5: identificado por 5
- 0,2: identificado por 2

Grau de desbalanceamento (GD):

- Alto desbalanceamento (GD(*alt*)): identificado por 1
- Médio desbalanceamento (GD(*méd*)): identificado por 2
- Baixo desbalanceamento (GD(*bxo*)): identificado por 3

Exemplo:

Seja o modelo, K13LC52

Esta sigla implica que o modelo representa um sistema de PCP tipo Kanban (K), com nível de WIP máximo igual a 13 (13), alocação de capacidades na forma linear crescente (LC), coeficiente de variabilidade 0,5 (5) e GD nível médio (2).

Vale ressaltar, que existem duas exceções no que tange ao sistema TPC. A primeira delas é que ele não se aplica a todas as configurações de distribuição de capacidades. A segunda exceção está relacionada ao nível máximo de WIP, o qual, no caso do TPC, refere-se ao nível máximo de WIP entre o primeiro recurso da linha e o recurso restritivo (ou gargalo, no caso). Mais uma vez, , não há limitação de WIP após a restrição.

3.3.1 Número de modelos simulados

Do que foi anteriormente apresentado, pode-se agora enumerar quantos modelos foram, de fato, elaborados e posteriormente simulados. No total, são 1386 combinações possíveis, sendo que deste total, existem 990 modelos propostos para estudo do *Reorder Point*, Kanban e do CONWIP e mais 396 para o estudo do TPC. A seguir são citadas todas as combinações consideradas.

- CONWIP, Kanban e *Reorder Point*

- configuração balanceada

- 5 níveis máximos de estoque em processo (5, 7, 9, 13 e 17 peças na linha)

- 3 tipos de sistemas de gestão (Kanban, CONWIP e ROP)

- 3 níveis de CV (0,2; 0,5 e 1,0)

- $subtotal = 1 \times 5 \times 3 \times 3 = 45$ combinações

- e demais configurações (7 tipos)

- 3 GDs para cada configuração

- 5 níveis máximos de estoque em processo (5, 7, 9, 13 e 17 peças na linha)

- 3 tipos de sistemas de gestão (Kanban, CONWIP e ROP)

- 3 níveis de CV (0,2; 0,5 e 1,0)

- $subtotal = 7 \times 3 \times 5 \times 3 \times 3 = 945$ combinações

- Total parcial: 990 combinações.

Além destes, existem também aqueles referentes aos modelos TPC, com *loop* formado entre a primeira operação e o RRC (Recurso com Restrição de Capacidade). Nestes modelos, existe uma limitação no nível de estoque entre o primeiro recurso da linha e o RRC, ficando liberado a quantidade de estoque a partir deste ponto, como já discutido anteriormente. Além disso, o TPC não é aplicado em quatro modalidades de alocação de cargas, que são: balanceada, linear decrescente, *step* e *bowl*, pois por possuírem mais de um RRC necessitariam de uma

abordagem muito complexa de programação. Cada modelo TPC foi simulado, no entanto, para 11 níveis de WIP entre o primeiro recurso e o gargalo (de 2 a 12 unidades de WIP). A escolha de um número maior de níveis de WIP para o TPC advém do fato que não se conhece, a princípio, quanto de WIP máximo deve ser aplicado antes do recurso gargalo para que se possa gerar um nível médio de WIP na linha como um todo compatível, para futuras comparações, com os resultados obtidos com os demais sistemas de PCP. Isso resulta nas seguintes combinações para os modelos TPC:

- TPC
 - 4 configurações (“V”, linear crescente, segmentado e em passo)
 - 3 GDs para cada configuração
 - 11 níveis máximos de estoque em processo
 - 3 níveis de CV (0,2; 0,5 e 1,0)
 - subtotal = $4 \times 3 \times 11 \times 3 = 396$ combinações
 - Total: 1386 modelos (990 + 396)

Dois tipos de estudos foram então conduzidos. O primeiro primou por buscar encontrar aquele sistema que melhor aproveitava a quantidade *máxima* de WIP permitida na linha. Tabelas foram elaboradas de maneira que correlacionasse a cada um dos cinco níveis de WIP (5, 7, 9, 13 e 17) o seu *throughput* resultante. Neste tipo de análise o sistema TPC não foi considerado pois este não limita o estoque em processo de toda a linha, e sim apenas antes do gargalo.

Em outro tipo de enfoque, toda a análise passa então para a comparação de desempenhos relacionados com *throughputs* resultantes de níveis *médios* de WIP, medidos durante o período de simulação e calculados por sub-rotinas contidas em cada programa dos modelos desenvolvidos. Tabelas e gráficos foram elaborados considerando-se então estes níveis médios. Aqui, o sistema TPC pôde ser analisado.

3.4 Modelagem dos sistemas de PCP

Cada um dos modelos representativos dos quatro sistemas de PCP adotados para a pesquisa possui algumas características peculiares que serão a seguir detalhadas. Tais características não definem por completo os sistemas de gestão pesquisados, mas permitem estudar como seus mecanismos de autorização e bloqueio de produção exploram as capacidades instaladas na linha.

3.4.1 O sistema ROP

Tem como característica fundamental o fato que existe um limite máximo de estocagem entre recursos e a produção é empurrada. A cada vez que este limite é atingido o recurso que o procede está desautorizado a continuar produzindo, sendo desbloqueado toda vez que o estoque cai abaixo do valor máximo estabelecido. O esquema a seguir representado pela figura 3.4 procura ilustrar este mecanismo.

FIGURA 3.4: Esquema ilustrativo do modelo ROP aplicado na pesquisa

As setas em azul indicam que as informações sobre disponibilidade de material para processar e níveis de estoques são vitais para autorização de produção de um recurso. Um recurso estará autorizado a produzir quando houver material no estoque que o precede e o nível de estoque que o sucede estiver abaixo do máximo estabelecido. Por haver disponibilidade ilimitada de matéria-prima, a produção do primeiro recurso dependerá única e exclusivamente do nível de estoque de material que o sucede, enquanto o último recurso, devido à presença de uma demanda infinita, produzirá sempre que houver material para processar. As setas vermelhas representam o fluxo de material entre os recursos.

3.4.2 O sistema Kanban

A lógica de funcionamento segue o modelo desenvolvido por TAYUR (1993) e é apresentado na figura 3.5. As peças completadas pelo recurso K-1 torna-se disponível para o recurso K. Como já dito, matéria-prima para o recurso 1 está sempre imediatamente disponível e a demanda por produtos finais é infinita. No recurso K há C_k kanbans (cartões), sendo que cada cartão implica a produção ou transporte de uma única peça. Uma peça deve adquirir um destes cartões para entrar no recurso e deve retê-lo durante todo o processo de fabricação. Depois que

uma peça foi completada pelo recurso K, ela permanece no supermercado com seu kanban, esperando ser transportada para o próximo recurso.

Pode-se notar que não é possível, tanto para o supermercado do recurso K quanto para o quadro de kanbans do recurso K + 1, estarem simultaneamente ocupados. Se um kanban está presente no quadro de kanbans do recurso K + 1 e uma peça está disponível no supermercado do recurso K, a peça é imediatamente transferida para a fila em frente do recurso K + 1, ficando retida a ela o cartão do quadro de kanbans do recurso K + 1. Isto é como os cartões kanban controlam os estoques. Quando uma peça completada é transportada para o próximo recurso (recurso K + 1), o kanban do recurso K é postado no quadro de kanbans do recurso K. Isto sinaliza para o recurso precedente, recurso K - 1, que o recurso K necessita de uma peça. Portanto, o kanban também serve como um sistema de informação entre recursos sucessivos.

Como, neste caso, um cartão kanban serve tanto para autorizar a produção de um recurso quanto também para sinalizar ou permitir o transporte de peças para os recursos consecutivos, afirma-se que o modelo de sistema Kanban adotado nesta pesquisa corresponde ao sistema Kanban com um único cartão ou sistema Kanban simples.

FIGURA 3.5: Esquema ilustrativo do modelo Kanban aplicado na pesquisa

3.4.3 O sistema CONWIP

O modelo CONWIP busca limitar o nível de WIP em todo o sistema ou linha de produção, permitindo que este flutue livremente entre os recursos. É dado, portanto, um tratamento igualitário entre os recursos da linha, não importando seu posicionamento nem seu nível de capacidade produtiva. A figura 3.6 ilustra a idéia acima apresentada.

FIGURA 3.6: Esquema ilustrativo do modelo CONWIP aplicado na pesquisa

Ainda que na figura estejam representados estoques individuais entre cada recurso da linha, o que está limitado é a soma destes estoques, ou seja, $\sum_i \Delta_i$ está limitada a um valor máximo.

3.4.4 O sistema Tambor-Pulmão-Corda

Segundo a teoria sobre TPC, um sistema gerenciado segundo este método deve ser capaz de identificar o recurso com menor capacidade da fábrica e explorá-lo ao máximo. Os demais recursos devem permitir que esta exploração aconteça, sem, no entanto, acarretar acréscimos de estoques desnecessários. Estes princípios fundamentais foram mantidos quando do desenvolvimento dos modelos TPC.

Como a demanda é infinita, o tambor deve indicar ao recurso restritivo que este produza sempre e o mais rápido possível. Para se garantir este nível de produção, um pulmão deve ser criado antes deste recurso e para se evitar que se libere material à linha acima do nível estabelecido pelo pulmão, modelou-se o sistema de forma que a cada peça produzida pelo gargalo um novo material é liberado à linha. Tal mecanismo é ilustrado na figura 3.7. Deve-se notar da figura que os estoques devem estar limitados antes do gargalo e liberados após ele.

Assim, mais uma vez, $\sum_i \Delta_i$ deve estar limitada a um valor máximo, onde Δ_i são os estoques localizados antes do RRC.

Um pré-requisito básico para aplicação do modelo TPC e estudo do efeito da exploração do recurso gargalo é que exista na linha um único e identificável recurso gargalo. Como já discutido anteriormente, a existência de mais de um recurso com restrição de capacidade é um complicador à implementação do método TPC, pois exige o uso de ferramentas computacionais que permitam que todas as restrições sejam devidamente exploradas. Por necessidade de simplificação dos modelos, optou-se por analisar o efeito da aplicação do método TPC apenas às configurações que contenham um único recurso gargalo.

Esta limitação levou à exclusão das configurações balanceadas, *bowl* e alternada no estudo do modelo. A configuração Linear Decrescente, por outro lado, apesar de possuir apenas um gargalo, este se localiza no final da linha. Neste caso, a aplicação do modelo TPC equivale ao CONWIP, ficando decidido que o estudo deste tipo de configuração ficasse alocado ao estudo do método CONWIP.

FIGURA 3.7: Esquema ilustrativo do modelo TPC aplicado na pesquisa

Em seguida, é discutida a simulação como método de pesquisa e apresentados alguns conceitos estatísticos essenciais à condução dos experimentos.

3.5 Seleção do método de pesquisa

Dadas as condições anteriores, com diversos modelos combinando as variáveis consideradas no estudo, necessitou-se escolher entre duas abordagens distintas que poderiam ser usadas na solução de problemas como propostos aqui. A primeira é baseada em modelos matemáticos e denominada de método analítico. A segunda é a simulação, cujo uso vem se intensificando nos últimos anos devido ao aprimoramento dos softwares e hardwares disponíveis e aos custos associados cada vez mais reduzidos.

No entanto, ambos os métodos possuem vantagens e limitações que podem ser assim resumidas:

Método analítico: baseado em modelos matemáticos;

- fornece resultados exatos;
- aplicabilidade restrita a modelos muito simples;
- devem assumir tempos de processamento exponenciais ou Erlang;
- podem ser de grande valia à validação de experimentos de simulação.

Simulação: baseado em experimentos de simulação;

- fornece resultados baseados em estimativas;
- aplicabilidade ampliada a modelos mais complexos;
- permite, em princípio, que se trabalhe com quaisquer formas de distribuição de tempos de processamento;
- resultados válidos apenas para a situação simulada.

Três fatores, entretanto, essenciais ao objetivo deste trabalho, determinaram a simulação como o método mais adequado para o desenvolvimento da tese. Tais fatores são:

- número de recursos da linha é muito grande para ser tratado matematicamente. O número de recursos selecionado para a pesquisa é cinco (ver item 3.2, tópico relativo a “número de recursos” com justificativa para escolha de cinco recursos).

- com a finalidade de se prover diferentes níveis de coeficientes de variabilidade aos tempos de processamento dos recursos, considerou-se inapropriada a limitação imposta pelo método analítico de se trabalhar com apenas duas formas distintas de distribuição de tempos de processamento.

- a representação matemática dos sistemas de gestão sugeridos no trabalho foi considerada muito complexa, principalmente quando comparada às facilidades permitidas pelo método da simulação.

Devido aos fatores acima mencionados, optou-se pela simulação como método mais adequado para o desenvolvimento da pesquisa aqui proposta. Definida a simulação como

método de pesquisa, buscou-se uma ferramenta de simulação que suportasse as exigências do trabalho e ao mesmo tempo fosse confiável, de fácil manuseio e que permitisse corretas validações e verificações dos modelos propostos. Dadas estas exigências, experimentou-se alguns sistemas de simulação como o ARENA e o ProModel, os quais se mostraram inapropriados para a manipulação de variáveis que a pesquisa exigia. Além disso, todo estudo de simulação está baseado na forma como números pseudo-aleatórios são gerados e, neste aspecto, segundo PAWLIKOWSKI (1999), o software GPSS/H da companhia *Wolverine Software Corporation* (BANKS et al. (1989) e SCHRIDER (1991)) foi tido como bastante eficiente.

Segundo STÄHL (1999), o GPSS/H tem a vantagem de ser o software para simulação de eventos discretos mais amplamente utilizado, como mostrado a seguir:

1. GPSS (12,2%), SIMAN, SLAM	30,9%
2. Automod, ProModel, WITNESS, etc.	22,0%
3. SIMSCRIPT, MODSIM, Simula	10,5%
4. FORTRAN, C/C++, ADA, BASIC, etc.	21,3%
5. 15 sistemas restantes, incluindo Excell, Stella	15,3%

Além disso, ainda segundo STÄHL (1999), o GPSS/H é um sistema bastante flexível e explícito, o que facilita o desenvolvimento dos modelos, as verificações e suas respectivas validações. É possível, com o GPSS/H, que se possa executar os modelos passo a passo, facilitando a identificação de problemas e possibilitando, portanto, adequadas validações. Outro ponto de destaque do GPSS/H está no seu gerador de números pseudo-aleatórios, não só por ser considerado um sistema confiável neste aspecto, mas também por permitir que o usuário possa ter controle sobre como o sistema está gerando esses números.

Ao conhecer-se em profundidade o software GPSS/H, pôde-se notar que, devido às facilidades de programação, a criação de modelos segundo as necessidades da pesquisa tornou-se facilitada. Por tudo isto, o GPSS/H foi selecionado como ferramenta para a condução dos experimentos.

3.6 Criação e validação dos modelos

De acordo com as variáveis selecionadas para a pesquisa, foram desenvolvidos os 1386 modelos anteriormente citados. No anexo A encontram-se alguns exemplos de modelos criados segundo a linguagem GPSS/H. Depois de desenvolvidos os modelos, procurou-se validá-los segundo alguns resultados encontrados na literatura técnica. Para tanto, optou-se por comparar

os resultados encontrados naquele considerado como o mais complexo dos modelos, o modelo Kanban. Considerou-se que se os resultados proporcionados pelo modelo Kanban fossem considerados válidos, os demais modelos, por serem simplificações do modelo Kanban, também o seriam.

Como exemplo, selecionou-se os resultados obtidos pelos modelos Kanban aplicados em uma linha balanceada com tempos de processamento exponencialmente distribuídos. Para validá-los, usou-se como referência os resultados obtidos em TAYUR (1993). Os seguintes resultados (tabela 3) foram encontrados para o número de cartões na linha iguais a 9 e 13:

TABELA 3.2: valores encontrados em TAYUR (1993) e nos modelos aqui desenvolvidos para comparação e validação.

	TAYUR	Tese	Diferença
9 cartões	32,325	32,867	1,68%
13 cartões	36,81	37,138	0,89%

Pode-se notar da tabela 3.2 que as diferenças encontradas entre os modelos é inferior a 2%. Esta pequena diferença deve estar relacionada com as diferentes sementes e geradores de números aleatórios utilizados. Em posse desses resultados, considerou-se validados os modelos aqui desenvolvidos.

3.7 Planejamento de experimentos

A simulação envolve a construção de um modelo que é, por natureza, matemático. No entanto, em lugar de descrever diretamente o comportamento geral do sistema, o modelo de simulação descreve a operação do sistema em termos dos eventos dos componentes individuais do sistema. Em particular, o sistema é subdividido em elementos cujos comportamentos possam ser preditos, pelo menos em termos das distribuições de probabilidade, para cada um dos vários possíveis estados do sistema e suas entradas. As inter-relações entre os elementos também são construídas dentro do modelo. Depois de construído o modelo, ele é ativado (pela geração de dados de entrada) para simular a operação real do sistema e registrar seu comportamento agregado. Repetindo isso para as várias configurações alternativas para o projeto e políticas de operação do sistema, e comparando seus desempenhos, podem ser identificadas as configurações mais promissoras. Devido ao erro estatístico, no entanto, é impossível garantir que a configuração que resulte no melhor desempenho simulado seja, de fato, a ótima. Ela deveria ser,

no entanto, pelo menos próxima da ótima se o experimento simulado tiver sido adequadamente projetado (HILLIER & LIEBERMAN.,1988).

Como qualquer atividade experimental, a simulação também exige um tratamento estatístico de seus resultados antes que qualquer conclusão possa ser tirada. “A diferença entre a simulação e os experimentos tradicionais é que na simulação os experimentos amostrais são feitos no modelo, em lugar do próprio sistema real, pois do contrário o experimento seria muito inconveniente, dispendioso e demorado. Por outro lado, os experimentos simulados deveriam ser vistos, virtualmente, como em nada diferentes dos experimentos reais, de forma que eles também deveriam estar baseados em sólida teoria estatística, (HILLIER & LIEBERMAN.,1988).

As simulações são geralmente aplicadas a sistemas dinâmicos, e nestes casos, desde que os eventos simulados são controlados por números randômicos, os resultados produzidos são nada mais, nada menos, que amostras estatísticas. Muitos estudos de simulação, no entanto, não passam de exercícios de pura programação (PAWLIKOWSKI, 1990), pois a maioria destes estudos se preocupa, principalmente, na construção e execução dos modelos, mas muito pouco com uma análise apropriada dos resultados obtidos com a simulação. O mesmo autor lembra ainda que se por um lado um dos propósitos da simulação é obter algum conhecimento sobre o comportamento dos sistemas, e não números, conclusões só podem ser alcançadas quando uma correta análise dos dados é executada. Assim, se outras formas de apresentar resultados podem ser utilizadas de maneira atrativa e útil quando o modelo é validado, como a animação por exemplo, nada pode substituir a necessidade de análise estatística dos dados gerados. Em resumo, a inferência estatística é uma necessidade absoluta em situações onde um programa produz diferentes dados gerados em cada corrida.

PAWLIKOWSKI (1999) afirma que o sucesso de um experimento de simulação não depende somente da elaboração de um modelo de simulação válido, mas também de assegurar que este modelo válido é usado em um experimento de simulação também válido. Para o autor, dois aspectos são considerados prioritários quando se procura garantir a validade de qualquer experimento baseado em simulação estocástica: (i) aplicação de apropriadas fontes de randomicidades e (ii) apropriada análise dos dados gerados. Quanto ao primeiro aspecto, espera-se estar satisfazendo as condições exigidas ao fazer-se uso do GPSS/H, um sistema considerado dos mais confiáveis para geração de números aleatórios (PAWLIKOWSKI, 1999).

O principal problema analítico encontrado na análise de resultados de simulação é que eles são altamente correlacionados e, portanto, não satisfazem a pré-condição de independência estatística, o que invalida os métodos tradicionais de análise estatística baseados em eventos

independentes e normalmente distribuídos. Geralmente, a análise de variância de processos correlacionados e a análise de suas funções autocorrelacionadas em particular, são um problema estatístico complexo e, portanto, cria uma enorme dificuldade na análise estatística dos resultados da simulação.

As simulações aqui executadas estão baseadas no estado de equilíbrio, isto é, o comportamento dos processos de fila é analisado depois de um longo período de tempo de geração de dados. Desde que as observações obtidas durante a fase transiente não caracterizam um estado estável, uma idéia natural seria descartar tais observações antes que a análise dos dados seja iniciada. Isto requer uma estimativa do efetivo comprimento do período transiente inicial. Ignorar a existência deste período pode levar a uma significativa parcialidade dos resultados finais. Por outro lado, a remoção de quaisquer observações aumenta a variância das estimativas. Logo, uma decisão de se apagar ou não observações iniciais depende do critério assumido em relação às estimativas. Isto afeta, por fim, os métodos usados para coletar observações, que serão brevemente discutidos em seguida.

PAWLIKOWSKI (1990), cita os seguintes métodos como os mais usados para análise de dados provenientes de experimentos de simulação baseados em estado de equilíbrio:

- Método de replicações independentes;
- Método de *batch means*;
- Método de *batch means* sobrepostos;
- Método das amostras não correlacionadas;
- Método dos ciclos regenerativos;
- Método baseado na análise espectral;
- Método baseado na representação auto-regressiva;
- Método baseado em séries de tempo padronizadas.

Para esta pesquisa, foi selecionado o método de *batch means*. Nesse método, coleta-se n observações $(x_1, x_2, \dots, x_n)$ as quais são divididas em uma série de k lotes (a palavra lote está aqui sendo usada como tradução de *batch*, cujo significado não tem nenhuma relação com o conceito de lote de produção) não sobrepostos $(x_{11}, x_{12}, \dots, x_{1m}), (x_{21}, x_{22}, \dots, x_{2m}), \dots$, de tamanho m , cujos resultados médios dos lotes são $\xi_1(m), \xi_2(m), \dots, \xi_k(m)$. A média μ_x é então estimada como sendo o valor médio dos k lotes de média $\xi_i(m)$. Esta abordagem está baseada na hipótese que observações mais separadas no tempo são menos correlacionadas (LAW, 1997). Logo, para lotes suficientemente longos, as médias desses lotes deveriam ser não correlacionadas. Pelo teorema

do limite central, as médias dos lotes podem também ser consideradas como aproximadamente normalmente distribuída. Se a parcialidade do valor de μ_x é a maior preocupação aqui, então novamente o efetivo comprimento do período transiente inicial deve ser determinado, e as primeiras n_0 observações coletadas durante este período devem ser desconsideradas. Portanto, a divisão de observações em k lotes de tamanho m deveria começar com o valor correspondente a $x_{11} = x_{n_0+1}$.

Segundo o que foi anteriormente dito, três decisões devem ser tomadas com a relação à aplicação do método de *batch means*:

- I. Determinação do comprimento do período transiente inicial c , portanto, do valor de n_0 ;

ODONI & ROTH (1983) examinou comportamento transiente de sistemas de filas Markovianas com um único servidor e capacidade infinita. Os resultados empíricos mostraram que,

- (i) Para pequenos valores de t , o comportamento de $Q(t)$ (número de clientes na fila no tempo t) é fortemente influenciado pelo estado inicial do sistema de filas. Para sistemas com condições iniciais determinísticas, pode-se aproximadamente prever, dentre um pequeno grupo de padrões, qual será o comportamento do sistema.
- (ii) Após um período inicial de tempo c independente das condições iniciais, $Q(t)$ se aproxima de $Q(\infty)$ em uma maneira que pode ser bem aproximada através do decaimento de uma função exponencial.
- (iii) O tempo constante τ (valor constante que pode ser usado para especificar um limitante superior para o comprimento de tempo após o qual a influência do estado inicial é negligenciável - pode ser mostrado que a taxa na qual a média do comprimento da fila ou a média de atrasos tende para um estado de equilíbrio é, depois de algum tempo, dominado por um termo na forma de $\exp(-t/\tau)$, onde τ é chamado de *tempo de relaxação*) associado à função exponencial é uma característica de cada sistema de filas e é independente das condições iniciais.
- (iv) Com base nas evidências experimentais, os autores desenvolveram uma expressão que fornece uma boa aproximação dos valores observados de τ . Esta expressão pode ser usada para determinar o limitante superior para a quantidade

de tempo necessária até que $Q(t)$ seja, para a maioria dos propósitos práticos, muito próximo de $Q(\infty)$. A expressão desenvolvida pelos autores é:

$$\tau = (C_a^2 + C_s^2) / 2.8\mu_x(1-\sqrt{\rho})^2$$

onde C_a^2 os C_s^2 são os coeficientes de variação quadrática para os tempos entre chegadas e de serviços, respectivamente, e $1/\mu_x$ é o tempo médio de serviço.

2. Seleção do tamanho do lote (parâmetro m) que minimize a correlação entre as médias desses lotes;

A seleção de um tamanho de lote que assegure uma não correlação entre os *batch means* parece ser o maior problema associado com esse método. Uma solução natural poderia ser estimar a correlação entre os *batch means* começando por um valor inicial do lote m_1 , e se a correlação não pode ser ignorada, aumenta-se o valor do lote e repete-se o teste. PAWLIKOWSKI (1990) lembra, no entanto, que os diversos procedimentos propostos para selecionar o tamanho do lote m usam várias técnicas estatísticas e vários critérios, levando geralmente a tamanhos de lotes bastante diferentes. Outro problema citado pelo autor é que os testes estatísticos geralmente envolvidos requerem tipicamente muito mais *batch means* para serem testados contra a autocorrelação do que é necessário para se conseguir resultados com uma desejada precisão. Conseqüentemente, tem sido registrado que alguns desses procedimentos podem levar a intervalos estimados com uma cobertura muito pobre, causados, entre outras razões, por aceitar-se tamanhos de lotes muito pequenos.

O mesmo autor conclui dizendo que o comprimento das corridas de simulação continua sendo um assunto crítico, especialmente no caso de estudos de simulação complexos, os quais freqüentemente podem ser desempenhados somente se uma técnica de apressamento no processo de coleta de dados for aplicado. Nesse contexto, um importante papel poderia ser executado pela técnica de redução de variância, estreitando o intervalo de confiança e portanto, reduzindo o número de passos necessários pelos procedimentos seqüenciais para alcançar-se a acuracidade necessária dos resultados. No entanto, foi verificado pelo autor que a técnica de análise de variância tem sido muito pouco usada na prática.

3. Escolha do número de lotes a ser aplicado no método.

SCHMEISER (1982) analisou teoricamente o *trade-off* que existe entre o número de lotes, o tamanho do lote e a cobertura dos intervalos de confiança. Os resultados mostraram que

o número de lotes usado na análise de intervalos de confiança não deveria ser menor que 10 e não necessitam ser maiores que 30, desde que a corrida de simulação seja longa o bastante para assegurar um adequado grau de normalidade e independência dos *batch means*. Isso significa que para se determinar um tamanho de lote que fornece níveis de correlação negligenciáveis e *batch means* aproximadamente normais, não há necessidade de se usar mais que $k=30$ lotes para se obter intervalos de confiança com uma boa cobertura. Logo, intervalos de confiança podem ser analisados através da construção de um pequeno número de grandes lotes. Tal procedimento melhora a normalidade e a independência dos *batch means* e, como tal, geralmente rende melhores coberturas dos intervalos de confiança.

3.7.1 Aplicação à pesquisa

Com a finalidade de se determinar cada um dos parâmetros necessários à execução dos experimentos através da técnica *batch means* foram realizados alguns experimentos piloto. A partir desses experimentos pôde-se verificar, para o caso específico dessa pesquisa, qual o tempo necessário para que o sistema entre em equilíbrio e qual a melhor estimativa para o tamanho do lote.

Para execução desses testes, foi escolhido o modelo representativo do sistema CONWIP, com cargas balanceadas e estoque em processo limitado em 25 itens. Observa-se que se preferiu simular o sistema CONWIP pois este, ao não limitar a capacidade de estocagem de WIP entre os recursos, deve ter um período de instabilidade superior ao Kanban. Foi ainda escolhido como nível máximo de WIP o valor de 25 unidades, maior que as necessidades da pesquisa, como fator de proteção aos resultados, já que mais tempo seriam necessários para equilíbrio do sistema neste caso. Foram realizados três testes, cada um com comprimento total de 1700 unidades de tempo de simulação divididos, porém, em intervalos de 50 unidades de tempo (tabela 3.3).

Dos dados obtidos do experimento verifica-se que o sistema entra rapidamente em equilíbrio (ainda que, provavelmente, mais lentamente que no Kanban). Isso já era esperado, já que o CONWIP tem capacidade limitada de estocagem de material de processo (25 no caso), o que leva a um rápido equilíbrio do sistema. A partir desses dados foi considerado apropriado escolher-se um período de inicialização de 200 unidades de tempo, já que, como pode ser verificado na tabela 4, após este intervalo de tempo os resultados já estão em regime. É possível perceber da tabela 4, inclusive, que já após 50 unidades de tempo os resultados já começam a entrar em regime. A escolha de 200 unidades de tempo possui, portanto, uma certa segurança.

Os dados também mostram que os valores obtidos para o *throughput* medidos em intervalos de tempo iguais a 50 unidades variam aleatoriamente, para cima e para baixo em torno de um valor médio. Tal constatação permite concluir-se que 50 unidades de tempo é um valor razoável para o tamanho do lote ou do *batch*.

A partir das discussões anteriores conclui-se dizendo que os experimentos de simulação a serem executados nesta pesquisa seguirão os seguintes procedimentos:

- Período de inicialização igual a 200 unidades de tempo.
- O comprimento de cada lote de simulação deverá corresponder a 50 unidades de tempo, ou seja, $m=50$.
- Cada corrida de simulação será dividida em 30 lotes ($k=30$). Logo cada corrida de simulação deverá durar 1500 (30×50) unidades de tempo, além do período de inicialização.
- Para que se possa testar cada modelo segundo valores iniciais distintos de geração de números aleatórios (sementes diferentes), cada modelo será executado 50 vezes. Portanto, cada modelo deverá gerar 1500 (50×30) *batches*, cujos valores médios do *throughput* serão usados para os testes de hipóteses.

Depois de definidos os procedimentos e parâmetros necessários à condução dos experimentos, o capítulo 4 que se segue abordará os resultados gerados, a estratégia utilizada para análise dos resultados e as observações e análises efetuadas.

TABELA 3.3: Dados simulados de uma linha balanceada com cinco recursos, controlada via CONWIP com limite de WIP igual a 25 itens.

Teste 1		Teste 2		Teste 3	
Tempo de corrida	Produção no intervalo	Tempo de corrida	Produção no intervalo	Tempo de corrida	Produção no intervalo
50	25	50	28	50	34
100	42	100	42	100	43
150	42	150	47	150	32
200	36	200	41	200	33
250	50	250	31	250	47
300	43	300	37	300	33
350	38	350	47	350	41
400	38	400	42	400	38
450	39	450	36	450	45
500	46	500	34	500	40
550	45	550	49	550	40
600	41	600	50	600	35
650	44	650	38	650	52
700	35	700	46	700	48
750	42	750	35	750	48
800	43	800	33	800	48
850	50	850	39	850	33
900	45	900	48	900	45
950	47	950	45	950	50
1000	41	1000	42	1000	49
1050	43	1050	38	1050	48
1100	41	1100	47	1100	31
1150	39	1150	40	1150	44
1200	47	1200	41	1200	41
1250	37	1250	43	1250	51
1300	42	1300	45	1300	41
1350	48	1350	39	1350	38
1400	39	1400	43	1400	35
1450	40	1450	42	1450	38
1500	40	1500	38	1500	38
1550	38	1550	51	1550	41
1600	49	1600	45	1600	39
1650	38	1650	44	1650	41
1700	44	1700	37	1700	37

4. EXECUÇÃO DO ESTUDO COMPARATIVO

O objetivo deste capítulo é realizar uma ampla análise dos resultados obtidos das simulações. Este capítulo abordará três temas principais: a simulação dos modelos, uma estratégia para análise dos resultados e análise dos resultados propriamente dita. Quanto a este último ponto, quatro assuntos principais foram considerados. O primeiro tratará de conclusões gerais, as quais se pressupõe que serão independentes das variáveis de controle aplicadas. O segundo refere-se às conclusões válidas tendo como variável de interesse o *throughput* obtido segundo níveis máximos de estoque em processo. O terceiro assunto abordará as conclusões desenvolvidas tendo como variável de interesse o *throughput* obtido segundo níveis médios de estoque em processo. Por fim, a última parte buscará listar algumas hipóteses que são, na verdade, deduções obtidas tanto dos resultados alcançados quanto da teoria presente no assunto. Porém, tais hipóteses não podem, de fato, serem afirmadas a partir da simples observação dos resultados experimentados.

4.1 Simulação dos modelos

Os resultados referentes à simulação, via GPSS/H, dos 1386 modelos gerados estão contidos nos anexos B e C. Neles pode-se encontrar duas formatações distintas de apresentação. No anexo B estão tabelados todos os resultados encontrados para cada modelo, especificando o *throughput* obtido (identificados por OP) segundo todos os níveis máximos de WIP (identificados por WM) pesquisados. Também neste anexo estão tabelados os *throughputs* relativos a combinações PCP x Critérios de alocação de capacidades. No anexo C estão apresentados o *throughput* obtido (também identificados por OP) e os correspondentes níveis médios de WIP (identificados por WA) verificados em cada simulação. Os valores de *throughput* referem-se à quantidade de peças produzidas dentro de um intervalo de tempo correspondente a um lote (*batch*) de simulação, ou seja, 50 unidades de tempo.

Por fim, no anexo D, os resultados estão formatados de maneira gráfica, identificando, para cada combinação das variáveis dos modelos, como o *throughput* varia segundo o nível

médio de WIP na linha. A necessidade de se apresentar resultados desta maneira é justificada no tópico 4.2 a seguir.

4.2 Estratégia para análise dos resultados

Devido a algumas características particulares que envolvem os sistemas de gestão a serem comparados, a execução dos experimentos deverá possuir algumas particularidades de modo a permitir uma correta análise dos resultados obtidos. O problema maior reside na maneira como os sistemas de gestão em estudo planejam e controlam seus estoques em processo. De fato, pode-se dizer que os sistemas ROP, Kanban e Conwip autorizam a liberação de trabalho segundo o *status* do sistema, ou seja, de acordo com o espaço disponível para processamento (ROP) ou baseado no número de cartões na linha (Kanban e CONWIP). Um ponto em comum em todos eles é que o nível de *estoque máximo* em processo não pode ultrapassar um certo limite preestabelecido, que é, por sua vez, determinado pelo espaço total disponível na linha (ROP) ou pelo total de kanbans circulando por toda a linha (Kanban e CONWIP).

O TPC, por sua vez, caracteriza-se por ser uma maneira híbrida entre as formas de puxar e empurrar a produção. No TPC, material é *puxado* segundo as necessidades do RRC ou do tambor e *empurrado* depois dele. Por isso, pode-se afirmar que existe um valor limite para o nível de estoque em processo entre o primeiro recurso da linha e o RRC, o que o caracterizaria como um sistema de puxar a produção. No entanto, para os casos onde se tem gargalos reais no sistema, isto é, a demanda de mercado supera a capacidade de produção do RRC, é intenção do TPC evitar que o gargalo pare por qualquer tipo de bloqueio imposto por um recurso localizado após ele na linha de fabricação. Tal procedimento exige que não se mantenha nenhuma forma de limitação no nível de estoque em processo depois do RRC, o que caracteriza um sistema de empurrar a produção. Logo, ao se analisar o que acontece em toda a extensão da linha, pode-se afirmar que não há um nível máximo de estoque em processo planejado no TPC.

A questão que surge é como comparar a primeira classe de sistemas de gestão (ROP, Kanban e CONWIP) onde o nível de WIP é limitado por um valor *máximo* com o sistema TPC, onde tal limite não existe. Se a capacidade de produção de toda uma linha varia segundo os níveis permitidos de WIP, como saber se um eventual melhor desempenho de um determinado método de gestão em termos *throughput* advém deste operar com maiores níveis de estoque em processo ou não?

Com a finalidade de se superar este problema, estabeleceu-se que os experimentos de simulação serão conduzidos observando-se, separadamente, os níveis *médios* e *máximos* de WIP

nos modelos simulados. O parâmetro nível *médio* de estoque no sistema será usado em conjunto com o *throughput* para se definir os desempenhos relativos entre todos os modelos simulados. Por outro lado, níveis *máximos* de WIP serão medidos com a finalidade de se comparar, segundo este parâmetro, quais modelos obtêm melhor desempenho. No entanto, modelos que operam segundo a lógica TPC ficam de fora desta análise, já que este não limita os estoques por toda a linha.

Antes de se detalhar como será efetuado cada um dos tipos de análises propostas (via WIP *médio* e *máximo*), deve-se observar que ambos os resultados são de grande valia para as pesquisas desta área. Ainda que a grande maioria dos estudos desenvolvidos na área da eficiência de linhas de manufatura tenha se prendido a conclusões obtidas segundo níveis *máximos* de WIP na linha, é igualmente importante avaliar-se como cada sistema melhor aproveita os níveis *médios* de estoques presentes por toda a linha. Assim, ambas as análises têm seu valor e aplicabilidade em termos estratégicos para a empresa.

Como exemplos das diferenças entre cada uma das análises, suponha-se o caso de uma empresa cujo principal componente dos custos associados à produção de seus bens seja os materiais aplicados ao produto final. Neste caso, pode ser de importância estratégica à empresa encontrar uma forma de gerenciar seu sistema produtivo de modo a melhor explorar a relação *throughput* e nível *médio* de WIP na fábrica, já que a medida WIP *médio* tem impacto direto nos custos de inventário da empresa.

Por outro lado, empresas cujos materiais são relativamente baratos ou pouco importantes, em termos de contribuição no perfil de custos, podem não necessariamente se preocupar com os níveis *médios* de WIP em sua planta. Tais empresas podem, no entanto, ter altos custos operacionais ou financeiros de acordo com a forma que o espaço físico é ocupado. Nestes casos, “otimizar” o uso dos espaços físicos disponíveis na planta pode ser uma questão fundamental para a sobrevivência da empresa. Uma vez que o nível *máximo* de WIP permitido na linha impõe a disponibilidade de espaço para estocagem, o estudo da relação *throughput* e WIP *máximo* pode ser de supra-importância.

4.2.1 Estratégia para análise dos resultados tendo como interesse o nível de WIP *médio*

O nível de WIP *médio* pode ser medido em quaisquer circunstâncias, o que possibilita a comparação de todos os modelos desenvolvidos. No entanto, o estudo nestas condições traz um complicador adicional: Como comparar dois modelos cujos níveis de WIP *médio* são diferentes? O exemplo a seguir ajuda a ilustrar esta situação.

Suponha-se que o modelo X, depois de simulado sob as condições discutidas no capítulo anterior, obtenha os seguintes resultados:

Modelo X:

Throughput: 40

WIP médio: 15

Outro modelo, modelo Y, também simulado sob as mesmas condições do modelo X, obteve como resultados:

Modelo Y:

Throughput: 38

WIP médio: 14

Qual dos modelos apresentou o melhor desempenho? Qual deles melhor explorou os estoques em processo presentes na linha?

Poder-se-ia pensar como solução ao problema dividir o *throughput* pelo WIP médio. Neste caso o modelo X teria como resultado um fator de 2,67 enquanto que o modelo Y obteria um fator de 2,71. O modelo Y é melhor que X?

A resposta a esta última pergunta é “não sabemos”. Como a relação *throughput* versus WIP médio não forma uma reta, dividir um pelo outro não é uma proposta razoável. Quem garante que, de alguma forma, se se conseguisse aumentar o nível de WIP médio do modelo Y para 15 seu *throughput* seria maior que 40? Como também não se é possível obter níveis iguais de WIP entre os modelos (já que o incremento no parâmetro nível máximo de WIP é discreto e o impacto disto no WIP médio é imprevisível), tal procedimento é inviável. E mesmo que possível fosse, não se poderia garantir a superioridade de um modelo sobre o outro por toda a faixa de valores em análise.

A sugestão que se faz aqui para se comparar modelos nestas condições é construir gráficos para ambos os modelos e analisar-se as curvas obtidas. Para os modelos que incorporem os métodos de gestão ROP, Kanban e CONWIP, cada gráfico, para cada modelo, teria cinco pontos, medidos nos cinco níveis máximos de WIP permitidos na linha. Para os modelos TPC, foram simulados diversos níveis de WIP máximos entre o primeiro recurso e o gargalo e medidos os níveis médios de WIP gerados.

Esta solução também traz problemas, entretanto. O primeiro deles é que, ao comparar-se curvas num gráfico, não se pode dizer o quanto um modelo é melhor que o outro e sim, se um modelo é melhor ou não que outro. A análise é, portanto muito mais qualitativa que quantitativa.

Outro limitante é que o uso de gráficos traz inerentes erros. Cada ponto do gráfico é unido por retas o que, como já dito anteriormente não é a maneira como se comporta a relação *throughput* por WIP. Além disso, as curvas podem, e de fato acontece, se cruzar, o que obriga uma resposta sobre o desempenho relativo de cada modelo baseado em faixas de valores. Em resumo, a análise por meio de gráficos, ainda que considerada aqui a única forma de se estudar os desempenhos dos sistemas testados, possui falhas e é, acima de tudo, baseado na análise do observador, o que o faz sujeito a interpretações errôneas.

Para facilitar o processo de análise, cada gráfico, o qual contem diversas curvas representativas dos modelos em estudo, foi dividido em três partes, segundo o nível de WIP. Assim, as comparações são feitas segundo três faixas de WIP na linha: baixo, médio e alto. Para cada faixa, são identificados quais modelos apresentaram melhores resultados, segundo o comportamento de sua curva. Muitas vezes, pode-se concluir que os desempenhos obtidos foram muito próximos o que impossibilita uma conclusão. Salienta-se também que a escolha de valores para WIP que divide o gráfico na três regiões citadas é arbitrária e varia de caso a caso. Por fim não serão feitos, durante a condução dos estudos, a não ser em alguns casos em que o autor considerar necessário, uma distinção entre grandes ou pequenas vantagens de um modelo em relação ao outro. Dir-se-á apenas que um sistema é *aparentemente* melhor ou pior que outro, e não muito melhor ou pouco pior.

Com o intuito de demonstrar como as observações foram geradas, um exemplo específico será aqui apresentado. Frisa-se, entretanto, que todas as análises focadas no nível médio de WIP foram efetuadas seguindo-se a mesma metodologia empregada neste caso em particular.

Exemplo: Análise dos sistemas de PCP empregados em uma linha segmentada com $CV=1,0$ e $GD_{(bco)}$.

Primeiramente, foram elaboradas tabelas (tabelas 4.1, 4.2, 4.3 e 4.4) com as informações necessárias à elaboração dos gráficos, as quais são mostradas a seguir.

TABELA 4.1: dados de desempenho do sistema TPC em uma linha segmentada com $CV=1,0$ e $GD_{(bxo)}$ (ver item 3.3 para legenda dos modelos)

Sistema Tambor-Pulmão-Corda						
Modelo	T2SEG13	T3SEG13	T4SEG13	T5SEG13	T6SEG13	T7SEG13
OP	25,067	30,129	33,471	35,941	37,751	39,074
WIP médio	3,466	5,103	6,746	8,427	10,008	11,540
Modelo	T8SEG13	T9SEG13	T10SEG13	T11SEG13	T12SEG13	
OP	40,145	41,017	41,725	42,364	42,899	
WIP médio	13,087	14,583	16,012	17,439	18,900	

TABELA 4.2: dados de desempenho do sistema CONWIP em uma linha segmentada com $CV=1,0$ e $GD_{(bxo)}$ (ver item 3.3 para legenda dos modelos)

Sistema CONWIP					
Modelo	C5SEG13	C7SEG13	C9SEG13	C13SEG13	C17SEG13
OP	28,047	32,220	34,989	38,363	40,442
WIP médio	4,552	6,237	7,892	11,138	14,323

TABELA 4.3: dados de desempenho do sistema Kanban em uma linha segmentada com $CV=1,0$ e $GD_{(bxo)}$ (ver item 3.3 para legenda dos modelos)

Sistema Kanban					
Modelo	K5SEG13	K7SEG13	K9SEG13	K13SEG13	K17SEG13
OP	24,594	29,541	32,825	37,072	39,417
WIP médio	3,791	5,309	6,476	9,934	12,472

TABELA 4.4: dados de desempenho do sistema ROP em uma linha segmentada com $CV=1,0$ e $GD_{(bxo)}$ (ver item 3.3 para legenda dos modelos)

Sistema Reorder Point					
Modelo	R5SEG13	R7SEG13	R9SEG13	R13SEG13	R17SEG13
OP	24,594	28,016	30,737	34,301	36,697
WIP médio	3,791	5,012	6,139	8,331	10,441

A partir das tabelas, gerou-se a figura 4.1:

FIGURA 4.1: Gráfico de desempenho dos sistemas de PCP em uma linha segmentada com $CV=1,0$ e $GD_{(txo)}$

Para se viabilizar a análise dos dados, o eixo das abscissas (eixo que mede o nível de WIP médio) foi dividido em três regiões, aproximadamente iguais, as quais representam três níveis de WIP *médio* (nível baixo, médio e alto). O critério de divisão é relativamente subjetivo e depende do comportamento do gráfico, porém, como critério geral, procura-se sempre manter cada uma das três regiões com a mesma faixa de WIP médio. Desta maneira, os seguintes gráficos foram gerados a partir do gráfico anterior (figuras 4.2, 4.3 e 4.4):

FIGURA 4.2: Gráfico de desempenho dos sistemas de PCP em uma linha segmentada com $CV=1,0$, $GD_{(bxo)}$ e WIP médio medido no seu nível baixo

FIGURA 4.3: Gráfico de desempenho dos sistemas de PCP em uma linha segmentada com $CV=1,0$, $GD_{(bxo)}$ e WIP médio medido no seu nível médio

FIGURA 4.4: Gráfico de desempenho dos sistemas de PCP em uma linha segmentada com $CV=1,0$, $GD_{(bxo)}$ e WIP médio medido no seu nível alto

Observando-se os gráficos, buscou-se analisar, para cada nível de WIP (baixo, médio e alto), o desempenho relativo de cada objeto de estudo, neste caso os sistemas de PCP.

4.2.2 Estratégia para análise dos resultados tendo como interesse o nível de WIP máximo

Aqui o planejamento de experimentos é bem mais simples. Como toda a comparação será feita na base do mesmo valor, ou seja, do nível máximo de WIP permitido na linha, não há a necessidade de se elaborar curvas de desempenho e a análise pode ser totalmente quantificável e objetiva. Os resultados estarão estruturados na forma de tabelas, as quais conterão, para cada combinação de coeficiente de variação, grau de desbalanceamento e nível máximo de WIP, quais são os desempenhos obtidos pelos sistemas de gestão da produção, segundo as diversas formas de alocação de capacidades. Entende-se como desempenho o *throughput* obtido segundo um determinado nível máximo de WIP.

4.3 Resultados gerados e análises preliminares

Os textos que se seguem tem como finalidade apresentar e discutir, numa forma de interpretação, os resultados alcançados após realização das corridas de simulação. Como já dito, os anexos B, C, D apresentam, nas formas de tabelas e gráficos, os resultados gerados na pesquisa. O anexo B apresenta 48 tabelas com os valores de *throughput* (representados por OP)

obtidos por cada modelo simulado, segundo diversas maneiras de se dispor os dados, sempre segundo níveis máximos de WIP. No anexo C são apresentadas 36 tabelas com os valores de *throughput* obtidos agora segundo o nível médio de WIP na linha. No anexo C, portanto, estão considerados os sistemas TPC.

No anexo D, encontram-se 129 gráficos gerados a partir das informações contidas nas tabelas do anexo C. Primeiramente, são apresentados gráficos (sempre *throughput* versus WIP médio) dos sistemas de PCP, segundo diversas alocações de distribuições de tempos de processamentos. Em seguida são apresentados os métodos de alocação de capacidades variando-se agora os sistemas de PCP. Em ambos os casos, gráficos estão seqüenciados variando-se primeiramente o grau de desbalanceamento e depois o coeficiente de variabilidade, assim como foi feito com a apresentação das tabelas.

A partir das tabelas e dos gráficos acima mencionados, foi realizada uma discussão dos resultados alcançados. Por uma questão de organização, optou-se por estruturar os textos segundo as hipóteses levantadas nessa tese. Na seqüência, no capítulo 5, são efetuadas conclusões oriundas das interpretações feitas no capítulo 4, sintetizando os resultados de uma maneira mais direta e agregada.

4.4 Análise dos resultados

Devido a grande massa de dados disponíveis, há uma imensa possibilidade de dispor os resultados e analisá-los. Sendo o objetivo central desta tese responder as perguntas elaboradas no início desse trabalho, optou-se por re-apresentar as hipóteses da pesquisa e analisar alguns resultados segundo cada uma dessas hipóteses. Não é intuito deste capítulo responder, de maneira objetiva, a cada uma das hipóteses formuladas (as quais serão efetivamente respondidas no capítulo 5), mas identificar algumas observações pertinentes a elas. Além disso, tornou-se conveniente dividir as análises segundo os níveis máximo e médio de WIP considerados para a análise das hipóteses.

4.4.1 Análise dos resultados baseada na hipótese 1

Hipótese 1: os desempenhos dos diversos tipos de configurações de distribuição de capacidades entre recursos de uma linha de manufatura variam significativamente segundo o sistema de gestão de produção empregado.

✓ Discussões em torno do nível máximo de WIP

As discussões que aqui se desenvolverão não irão contemplar o sistema TPC, já que este só pode ser analisado segundo o nível médio de WIP. Também, maior ênfase será dada às alocações balanceada e *bowl*, já que estas foram foco de grande parte das pesquisas sobre alocação de capacidades.

Alocação balanceada

- A alocação balanceada foi a melhor opção para se distribuir capacidades na grande maioria dos casos.
- A alocação balanceada se mostrou mais apta quando aplicada ao sistema CONWIP. Nesta situação, apenas quando o nível máximo de WIP foi 5 e o CV igual a 0,2 a alocação balanceada foi superada por um outro critério de alocação (alocação em V).

Alocação Bowl

- A alocação bowl se mostrou mais apta para sistemas ROP do que para os demais sistemas de PCP.
- Em sistemas ROP, a alocação bowl se mostrou melhor em níveis mais baixos de WIP e mais altos de CV.

Estes resultados parecem confirmar as pesquisas relacionadas ao fenômeno *bowl* e já discutidas anteriormente. No entanto, observou-se também que a eficiência do arranjo *bowl* não é apenas afetada pelo nível de WIP permitido ou então pelo CV. Aplicado em outros sistemas de PCP (Kanban e CONWIP) seu desempenho é prejudicado, como explicado a seguir.

- A alocação bowl não se mostrou ser o melhor critério de alocação de capacidades quando aplicado ao sistema CONWIP. Quando aplicado ao Kanban a alocação bowl também tem seu desempenho relativo reduzido, ainda que seja a melhor opção em algumas situações.
- A afirmação que a alocação bowl é mais eficiente em níveis mais baixos de WIP ou mais altos de CV, não se mantém quando aplicado ao sistema CONWIP.

Além disso, pôde-se observar ainda que:

- O formato bowl pode apresentar desempenhos melhores em níveis de desbalanceamento mais altos ($GD_{(alt)}$ e $GD_{(méd)}$) quando o sistema ROP é aplicado. Num nível de WIP baixo (5), isto ocorreu em todos os níveis de variabilidade. Com

WIP mais alto (≥ 9) este fato passa a ocorrer apenas quando a variabilidade é mais alta ($CV=1,0$).

Este resultado confirma a tese que o fenômeno *bowI* é bastante robusto, podendo apresentar bons resultados mesmo quando o grau de desbalanceamento é mais alto. Ver PIKE & MARTIN (1994).

- Com exceção do formato *bowI*, todas as demais formas de alocação de carga, sob quaisquer PCPs, níveis de WIP ou variabilidades, apresentaram melhor desempenho quando o nível de desbalanceamento foi baixo ($GD_{(bto)}$).

Esta observação pode ser analisada à luz do fato que o formato *bowI*, devido ao maior número de estudos sobre o tema, foi escolhido como gerador das diretrizes para o cálculo dos tempos de processamento para todas as alocações de capacidades produtivas estudadas e sob quaisquer níveis de variabilidade. Este fato pode ser responsável pelas conclusões anteriormente observadas.

Alocação linear decrescente

- Foi a melhor opção quando aplicada ao sistema Kanban, com WIP igual a 9, GD baixo e $CV=0,5$ e $1,0$.

Alocação segmentada

- Foi a melhor opção quando aplicada ao sistema ROP, com WIP igual a 7, GD baixo e $CV=0,5$ e $1,0$.

Alocação em V

- Foi a melhor opção quando aplicada ao sistema CONWIP, com WIP igual a 5, $CV=0,2$ e GD baixo.

Demais alocações

Não foi identificada nenhuma observação relevante.

A tabela 4.5 a seguir resume os melhores desempenhos para os critérios de alocação de capacidades para cada situação pesquisada.

TABELA 4.5: os melhores critérios de alocação de capacidades para cada PCP segundo o enfoque do nível máximo de WIP

WIP	PCP	GD baixo e balanceada			GD médio e balanceada			GD alto e balanceada		
		CV=0,2	CV=0,5	CV=1,0	CV=0,2	CV=0,5	CV=1,0	CV=0,2	CV=0,5	CV=1,0
5	ROP	bowl	bowl	bowl	balanceada	bowl	bowl	balanceada	balanceada	bowl
	Kanban	bowl	bowl	bowl	balanceada	bowl	bowl	balanceada	balanceada	bowl
	CONWIP	V	balanceada	balanceada	balanceada	balanceada	balanceada	balanceada	balanceada	balanceada
7	ROP	segmentada	segmentada	segmentada	balanceada	balanceada	balanceada	balanceada	balanceada	balanceada
	Kanban	balanceada	bowl	bowl	balanceada	balanceada	bowl	balanceada	balanceada	balanceada
	CONWIP	balanceada	balanceada	balanceada	balanceada	balanceada	balanceada	balanceada	balanceada	balanceada
9	ROP	balanceada	bowl	bowl	balanceada	balanceada	bowl	balanceada	balanceada	bowl
	Kanban	balanceada	LD	LD	balanceada	balanceada	balanceada	balanceada	balanceada	balanceada
	CONWIP	balanceada	balanceada	balanceada	balanceada	balanceada	balanceada	balanceada	balanceada	balanceada
13	ROP	balanceada	bowl	bowl	balanceada	balanceada	bowl	balanceada	balanceada	balanceada
	Kanban	balanceada	balanceada	balanceada	balanceada	balanceada	balanceada	balanceada	balanceada	balanceada
	CONWIP	balanceada	balanceada	balanceada	balanceada	balanceada	balanceada	balanceada	balanceada	balanceada
17	ROP	balanceada	bowl	bowl	balanceada	balanceada	bowl	balanceada	balanceada	balanceada
	Kanban	balanceada	balanceada	balanceada	balanceada	balanceada	balanceada	balanceada	balanceada	balanceada
	CONWIP	balanceada	balanceada	balanceada	balanceada	balanceada	balanceada	balanceada	balanceada	balanceada

✓ Discussões em torno do nível médio de WIP

Aqui serão analisados os diversos métodos de alocação de capacidades segundo quatro tipos de sistemas de PCP. Dois pontos devem ser destacados aqui. Primeiramente, o método TPC, como já comentado anteriormente, não se aplica a todos os métodos de alocação, sendo estudado apenas nos critérios Linear Crescente, *Step*, em V e Segmentado. No entanto, uma particularidade ocorreu na aplicação dos sistemas TPC nos critérios Linear Crescente e *Step*. Nestes casos, ao se variar o parâmetro WIP, o nível de WIP médio e, conseqüentemente, o *throughput*, não se altera. Desta forma, ao se elaborar gráficos para o sistema TPC, surgirá apenas um ponto, dificultando a comparação do TPC com os demais sistemas de PCP. Em algumas situações, inclusive, o nível de WIP médio correspondente a este único ponto gerado para o sistema TPC não corresponde a nenhum nível médio de WIP gerado pelas curvas dos demais sistemas de PCP. A comparação neste caso torna-se inviável. Por isso, nas alocações Linear Crescente e *Step*, nem sempre o sistema TPC será citado nas observações.

Alocação balanceada

- Os sistemas Kanban e CONWIP possuem desempenhos bastante similares em linhas balanceadas. Ainda que seja difícil precisar pelos gráficos, parece haver um leve predomínio do sistema CONWIP sobre o Kanban. Pode-se notar, entretanto, que o sistema Kanban em algumas situações supera o sistema CONWIP.

Este resultado contradiz, em parte, os estudos de TAYUR (1993) e MUCKSTADT & TAYUR (1995a e 1995b), que afirmam ser o sistema Kanban o que apresenta o maior *throughput* para determinado nível de WIP médio. Isto não se verificou em diversas situações, principalmente quando o CV foi igual a 1,0.

- O sistema ROP parece nunca superar os sistemas CONWIP e Kanban em linhas balanceadas.

A tabela 4.6 a seguir apresenta os resultados para linhas balanceadas.

TABELA 4.6: tabela de desempenho de sistemas de PCP em linhas balanceadas

CV = 0,2 e Balanceada			
Desemp. WIP	Primeiro	Segundo	Terceiro
Baixo	CONWIP/kanban	CONWIP/kanban	Reorder Point
Médio	CONWIP	Kanban	Reorder Point
Alto	CONWIP	Kanban	Reorder Point
CV = 0,5 e Balanceada			
Desemp. WIP	Primeiro	Segundo	Terceiro
Baixo	CONWIP/kanban	CONWIP/kanban	Reorder Point
Médio	CONWIP/kanban	CONWIP/kanban	Reorder Point
Alto	CONWIP/kanban	CONWIP/kanban	Reorder Point
CV = 1,0 e Balanceada			
Desemp. WIP	Primeiro	Segundo	Terceiro
Baixo	CONWIP	kanban	Reorder Point
Médio	CONWIP	Kanban	Reorder Point
Alto	CONWIP	Kanban	Reorder Point

Alocação em *bowl*

- Parece existir uma tendência dos sistemas CONWIP, Kanban e ROP terem desempenhos similares em linhas tipo bowl quando o GD é alto, o CV é baixo e o WIP é alto.
- O sistema CONWIP tende a ser superior ao Kanban quando o CV é alto em linhas tipo bowl.

- Na alocação tipo bowl, o sistema CONWIP parece ser superior ao sistema Kanban quando o nível médio de WIP é baixo. Conforme se aumenta o nível de WIP na linha, o sistema Kanban tende a se igualar ou até mesmo a superar o CONWIP em alguns pontos.
- O sistema ROP parece nunca superar os sistemas Kanban ou CONWIP, ainda que em algumas situações as diferenças sejam pequenas.

As tabelas 4.7, 4.8 e 4.9 a seguir apresentam os resultados para linhas em *bowl*.

TABELA 4.7: tabela de desempenho de sistemas de PCP em linhas tipo bowl com CV=1,0

CV = 1,0, GD(alt) e Bowl			
Desemp. WIP	Primeiro	Segundo	Terceiro
Baixo	CONWIP	Kanban	Reorder Point
Médio	CONWIP	Kanban	Reorder Point
Alto	CONWIP	Kanban	Reorder Point
CV = 1,0, GD(méd) e Bowl			
Desemp. WIP	Primeiro	Segundo	Terceiro
Baixo	CONWIP	Kanban	Reorder Point
Médio	CONWIP	Kanban	Reorder Point
Alto	CONWIP	Kanban	Reorder Point
CV = 1,0, GD(bxo) e Bowl *			
Desemp. WIP	Primeiro	Segundo	Terceiro
Baixo	CONWIP	Kanban	Reorder Point
Médio	CONWIP	Kanban	Reorder Point
Alto	CONWIP	Kanban	Reorder Point

* A diferença entre o CONWIP e o Kanban, no entanto, é menor que nos casos acima

TABELA 4.8: tabela de desempenho de sistemas de PCP em linhas tipo *bowl* com CV=0,5

CV = 0,5, GD(alt) e Bowl			
Desemp. WIP	Primeiro	Segundo	Terceiro
Baixo	CONWIP	Kanban	Reorder Point
Médio	CONWIP	Kanban	Reorder Point
Alto	CONWIP	Kanban	Reorder Point
CV = 0,5, GD(méd) e Bowl			
Desemp. WIP	Primeiro	Segundo	Terceiro
Baixo	CONWIP	Kanban	Reorder Point
Médio	CONWIP	Kanban	Reorder Point
Alto	CONWIP	Kanban	Reorder Point
CV = 0,5, GD(bxo) e Bowl *			
Desemp. WIP	Primeiro	Segundo	Terceiro
Baixo	CONWIP	Kanban	Reorder Point
Médio	CONWIP	Kanban	Reorder Point
Alto	CONWIP	Kanban	Reorder Point
* A diferença entre o CONWIP e o Kanban, no entanto, é pequena			

TABELA 4.9: tabela de desempenho de sistemas de PCP em linhas tipo *bowl* com CV=0,2

CV = 0,2, GD(alt) e Bowl			
Desemp. WIP	Primeiro	Segundo	Terceiro
Baixo	CONWIP	Kanban	Reorder Point
Médio	CONWIP/Kanban	CONWIP/Kanban	Reorder Point
Alto	CONWIP/Kanban/Reorder Point	CONWIP/Kanban/Reorder Point	CONWIP/Kanban/Reorder Point
CV = 0,2, GD(méd) e Bowl			
Desemp. WIP	Primeiro	Segundo	Terceiro
Baixo	CONWIP	Kanban	Reorder Point
Médio	CONWIP/Kanban	CONWIP/Kanban	Reorder Point
Alto	CONWIP/Kanban/Reorder Point	CONWIP/Kanban/Reorder Point	CONWIP/Kanban/Reorder Point
CV = 0,2, GD(bxo) e Bowl *			
Desemp. WIP	Primeiro	Segundo	Terceiro
Baixo	CONWIP	Kanban	Reorder Point
Médio	CONWIP	Kanban	Reorder Point
Alto	CONWIP	Kanban	Reorder Point
* A diferença entre o CONWIP e o Kanban, no entanto, é pequena			

Alocação linear crescente

- Nas alocações tipo linear crescente parece não haver muita diferença entre os sistemas CONWIP e Kanban. Conforme se diminui o CV, ou se aumenta o grau de desbalanceamento, o sistema *Reorder Point* tende a ter um desempenho também muito próximo dos outros dois sistemas de PCP, podendo superá-los em algumas situações. No entanto, a forma como os pontos estão distribuídos nos gráficos não permitem que se extraia boas conclusões.
- Como o sistema TPC gera apenas gráficos com um único ponto quando aplicado em alocações do tipo Linear Crescente, fica difícil efetuar-se boas análises. Quando o CV é 1,0, o ponto representando o sistema TPC ficou muito distante dos gráficos relacionados aos demais PCPs. Num nível variabilidade 0,5, por sua vez, o TPC fez coincidir seu ponto com os demais gráficos, podendo-se dizer que houve um empate deste com os demais sistemas de PCP. No entanto, quando CV é 0,5 e o GD é médio, o ponto representativo do sistema TPC está acima dos demais gráficos, mostrando ser portanto, superior aos demais sistemas.

As tabelas 4.10, 4.11 e 4.12 a seguir apresentam os resultados para linhas tipo linear crescente.

TABELA 4.10: tabela de desempenho de sistemas de PCP em linhas tipo linear crescente com CV=1,0

CV = 1,0, GD(alt) e Linear Crescente				
Desemp. WIP	Primeiro	Segundo	Terceiro	Quarto
Baixo	Kanban	Reorder Point	CONWIP	*
Médio	Kanban	CONWIP/Reorder Point	CONWIP/Reorder Point	*
Alto	Kanban	Reorder Point	CONWIP	*
CV = 1,0, GD(méd) e Linear Crescente				
Desemp. WIP	Primeiro	Segundo	Terceiro	Quarto
Baixo	Kanban/CONWIP	Kanban/CONWIP	Reorder Point	*
Médio	Kanban	CONWIP	Reorder Point	*
Alto	Kanban	CONWIP	Reorder Point	*
CV = 1,0, GD(bxo) e Linear Crescente				
Desemp. WIP	Primeiro	Segundo	Terceiro	Quarto
Baixo	CONWIP	Kanban	Reorder Point	*
Médio	Kanban/CONWIP	Kanban/CONWIP	Reorder Point	*
Alto	Kanban/CONWIP	Kanban/CONWIP	Reorder Point	*

* O TPC é expresso apenas por um único ponto e numa faixa de valores que não permite comparações

TABELA 4.11: tabela de desempenho de sistemas de PCP em linhas tipo linear crescente com $CV=0,5$

CV = 0,5, GD(alt) e Linear Crescente				
Desemp. WIP	Primeiro	Segundo	Terceiro	Quarto
Baixo	Reorder Point	Kanban	CONWIP	*
Médio	Reorder Point/Kanban	Reorder Point/Kanban	CONWIP	*
Alto	Reorder Point	Kanban	CONWIP	*
CV = 0,5, GD(méd) e Linear Crescente				
Desemp. WIP	Primeiro	Segundo	Terceiro	Quarto
Baixo	Kanban/CONWIP	Kanban/CONWIP	Reorder Point	*
Médio	Kanban/CONWIP	Kanban/CONWIP	Reorder Point	*
Alto	TPC	Kanban	CONWIP	Reorder Point
CV = 0,5, GD(bxo) e Linear Crescente				
Desemp. WIP	Primeiro	Segundo	Terceiro	Quarto
Baixo	Kanban/CONWIP	Kanban/CONWIP	Reorder Point	*
Médio	Kanban/CONWIP	Kanban/CONWIP	Reorder Point	*
Alto	Kanban	CONWIP	Reorder Point	*

* O TPC é expresso apenas por um único ponto e numa faixa de valores que não permite comparações

TABELA 4.12: tabela de desempenho de sistemas de PCP em linhas tipo linear crescente com $CV=0,2$

CV = 0,2, GD(alt) e Linear Crescente				
Desemp. WIP	Primeiro	Segundo	Terceiro	Quarto
Baixo	CONWIP	Reorder Point/Kanban	Reorder Point/Kanban	*
Médio	Reorder Point/Kanban	Reorder Point/Kanban	CONWIP	*
Alto	Reorder Point/Kanban	Reorder Point/Kanban	CONWIP	*
CV = 0,2, GD(méd) e Linear Crescente				
Desemp. WIP	Primeiro	Segundo	Terceiro	Quarto
Baixo	CONWIP	Reorder Point/Kanban	Reorder Point/Kanban	*
Médio	Reorder Point/Kanban	Reorder Point/Kanban	CONWIP	*
Alto	Reorder Point/Kanban	Reorder Point/Kanban	CONWIP	*
CV = 0,2, GD(bxo) e Linear Crescente				
Desemp. WIP	Primeiro	Segundo	Terceiro	Quarto
Baixo	Kanban/CONWIP/Reorder Point	Kanban/CONWIP/Reorder Point	Kanban/CONWIP/Reorder Point	*
Médio	Kanban	Reorder Point	CONWIP	*
Alto	Reorder Point	Kanban	CONWIP	*

* O TPC é expresso apenas por um único ponto e numa faixa de valores que não permite comparações

Alocação linear decrescente

- O sistema CONWIP tende a ter um desempenho crescentemente superior aos sistemas Kanban e *Reorder Point*, com CV iguais a 1,0 e 0,5 conforme se aumenta o grau de desbalanceamento das linhas de produção dispostas segundo a política de alocação de capacidades linear decrescente. Com CV igual a 0,2 este fenômeno não se verificou. No entanto, o sistema CONWIP parece continuar sendo a melhor opção com CV igual 0,2, ainda que a diferença para os demais PCPs seja bastante pequena, principalmente com níveis de desbalanceamentos mais altos.
- O sistema ROP parece nunca superar o sistema Kanban em quaisquer situações na alocação Linear Decrescente.

As tabelas 4.13, 4.14 e 4.15 a seguir apresentam os resultados para linhas tipo linear decrescente.

TABELA 4.13: tabela de desempenho de sistemas de PCP em linhas tipo linear decrescente com CV=1,0

CV = 1,0, GD(alt) e Linear Decrescente			
Desemp. WIP	Primeiro	Segundo	Terceiro
Baixo	CONWIP	Kanban	Reorder Point
Médio	CONWIP	Kanban	Reorder Point
Alto	CONWIP	Kanban	Reorder Point
CV = 1,0, GD(méd) e Linear Decrescente			
Desemp. WIP	Primeiro	Segundo	Terceiro
Baixo	CONWIP	Kanban	Reorder Point
Médio	CONWIP	Kanban	Reorder Point
Alto	CONWIP	Kanban	Reorder Point
CV = 1,0, GD(bxo) e Linear Decrescente			
Desemp. WIP	Primeiro	Segundo	Terceiro
Baixo	CONWIP	Kanban	Reorder Point
Médio	CONWIP	Kanban	Reorder Point
Alto	CONWIP	Kanban	Reorder Point

TABELA 4.14: tabela de desempenho de sistemas de PCP em linhas tipo linear decrescente com $CV=0,5$

CV = 0,5, GD(alt) e Linear Decrescente			
Desemp. WIP	Primeiro	Segundo	Terceiro
Baixo	CONWIP	Kanban	Reorder Point
Médio	CONWIP	Kanban	Reorder Point
Alto	CONWIP	Kanban	Reorder Point
CV = 0,5, GD(méd) e Linear Decrescente			
Desemp. WIP	Primeiro	Segundo	Terceiro
Baixo	CONWIP	Kanban	Reorder Point
Médio	CONWIP	Kanban	Reorder Point
Alto	CONWIP	Kanban	Reorder Point
CV = 0,5, GD(bxo) e Linear Decrescente			
Desemp. WIP	Primeiro	Segundo	Terceiro
Baixo	CONWIP	Kanban	Reorder Point
Médio	CONWIP	Kanban	Reorder Point
Alto	CONWIP	Kanban	Reorder Point

TABELA 4.15: tabela de desempenho de sistemas de PCP em linhas tipo linear decrescente com $CV=0,2$

CV = 0,2, GD(alt) e Linear Decrescente			
Desemp. WIP	Primeiro	Segundo	Terceiro
Baixo	CONWIP	Kanban	Reorder Point
Médio	CONWIP/Kanban	CONWIP/Kanban	Reorder Point
Alto	CONWIP/Kanban/Reorder Point	CONWIP/Kanban/Reorder Point	CONWIP/Kanban/Reorder Point
CV = 0,2, GD(méd) e Linear Decrescente			
Desemp. WIP	Primeiro	Segundo	Terceiro
Baixo	CONWIP	Kanban	Reorder Point
Médio	CONWIP/Kanban	CONWIP/Kanban	Reorder Point
Alto	CONWIP/Kanban/Reorder Point	CONWIP/Kanban/Reorder Point	CONWIP/Kanban/Reorder Point
CV = 0,2, GD(bxo) e Linear Decrescente			
Desemp. WIP	Primeiro	Segundo	Terceiro
Baixo	CONWIP	Kanban	Reorder Point
Médio	CONWIP	Kanban	Reorder Point
Alto	CONWIP	Kanban	Reorder Point
* Mesmo nas condições onde há empate o CONWIP leva ainda uma pequena vantagem sobre o Kanban e este sobre o JIC			

Alocação alternada

- Na alocação alternada os sistemas Kanban e CONWIP novamente apresentam desempenhos bastante similares, podendo-se afirmar que o sistema Kanban supera o CONWIP em algumas situações.
- O sistema ROP parece nunca superar os sistemas Kanban ou CONWIP em quaisquer situações na alocação alternada, porém algumas vezes seu desempenho se aproxima muito dos outros dois sistemas de PCP.

As tabelas 4.16, 4.17, 4.18 a seguir apresentam os resultados para linhas tipo alternada.

TABELA 4.16: tabela de desempenho de sistemas de PCP em linhas tipo alternada com CV=1,0

CV = 1,0, GD(alt) e Alternada			
Desemp. WIP	Primeiro	Segundo	Terceiro
Baixo	CONWIP	Kanban	Reorder Point
Médio	CONWIP	Kanban	Reorder Point
Alto	CONWIP	Kanban	Reorder Point
CV = 1,0, GD(méd) e Alternada			
Desemp. WIP	Primeiro	Segundo	Terceiro
Baixo	CONWIP	Kanban	Reorder Point
Médio	CONWIP	Kanban	Reorder Point
Alto	CONWIP	Kanban	Reorder Point
CV = 1,0, GD(bxo) e Alternada			
Desemp. WIP	Primeiro	Segundo	Terceiro
Baixo	CONWIP	Kanban	Reorder Point
Médio	CONWIP	Kanban	Reorder Point
Alto	CONWIP	Kanban	Reorder Point
* A redução do grau de desbalanceamento diminui a diferença entre CONWIP e Kanban			

TABELA 4.17: tabela de desempenho de sistemas de PCP em linhas tipo alternada com CV=0,5

CV = 0,5, GD(alt) e Alternada			
Desemp. WIP	Primeiro	Segundo	Terceiro
Baixo	Kanban/CONWIP	Kanban/CONWIP	Reorder Point
Médio	Kanban	CONWIP	Reorder Point
Alto	Kanban	CONWIP	Reorder Point
CV = 0,5, GD(méd) e Alternada			
Desemp. WIP	Primeiro	Segundo	Terceiro
Baixo	Kanban/CONWIP	Kanban/CONWIP	Reorder Point
Médio	Kanban/CONWIP	Kanban/CONWIP	Reorder Point
Alto	Kanban	CONWIP	Reorder Point
CV = 0,5, GD(bxo) e Alternada *			
Desemp. WIP	Primeiro	Segundo	Terceiro
Baixo	Kanban/CONWIP	Kanban/CONWIP	Reorder Point
Médio	Kanban/CONWIP	Kanban/CONWIP	Reorder Point
Alto	Kanban/CONWIP	Kanban/CONWIP	Reorder Point

* Parece haver, entretanto, uma pequena vantagem do sistema CONWIP

TABELA 4.18: tabela de desempenho de sistemas de PCP em linhas tipo alternada com CV=0,2

CV = 0,2, GD(alt) e Alternada			
Desemp. WIP	Primeiro	Segundo	Terceiro
Baixo	Kanban/CONWIP	Kanban/CONWIP	Reorder Point
Médio	Kanban	CONWIP	Reorder Point
Alto	Kanban	CONWIP	Reorder Point
CV = 0,2, GD(méd) e Alternada			
Desemp. WIP	Primeiro	Segundo	Terceiro
Baixo	Kanban/CONWIP	Kanban/CONWIP	Reorder Point
Médio	Kanban	CONWIP	Reorder Point
Alto	Kanban	CONWIP	Reorder Point
CV = 0,2, GD(bxo) e Alternada *			
Desemp. WIP	Primeiro	Segundo	Terceiro
Baixo	Kanban/CONWIP	Kanban/CONWIP	Reorder Point
Médio	Kanban	CONWIP	Reorder Point
Alto	Kanban/CONWIP	Kanban/CONWIP	Reorder Point

* A diferença entre desempenhos do CONWIP e Kanban é menor nesta situação

Alocação segmentada

- Quando o CV é 1,0 o sistema TPC parece ser sempre superior aos demais sistemas de PCP, porém a diferença tende a diminuir com a redução do grau de desbalanceamento. Ainda neste nível de variabilidade os sistemas CONWIP e Kanban parecem ter desempenhos bastante similares, porém nunca superados pelo ROP.
- Para um CV de 0,5 a vantagem do TPC sobre os demais parece diminuir, com leve tendência a uma redução adicional com a diminuição no grau de desbalanceamento. Mais uma vez os sistemas CONWIP e Kanban parecem ter desempenhos bastante similares, porém nunca superados pelo ROP neste nível de variabilidade.
- Com CV igual a 0,2 todos os quatro sistemas passam a ter desempenhos bastante similares, com exceção ao que ocorre quando GD é baixo. Neste caso, o sistema ROP se mostrou inferior, principalmente para níveis de WIP variando de baixo a médio.

As tabelas 4.19, 4.20, 4.21 a seguir apresentam os resultados para linhas tipo segmentada.

TABELA 4.19: tabela de desempenho de sistemas de PCP em linhas tipo segmentada com CV=1,0

CV = 1,0, GD(alt) e Segmentada				
Desemp. WIP	Primeiro	Segundo	Terceiro	Quarto
Baixo	TPC	CONWIP	Kanban	Reorder Point
Médio	TPC	CONWIP	Kanban	Reorder Point
Alto	TPC	Kanban	CONWIP	Reorder Point
CV = 1,0, GD(méd) e Segmentada				
Desemp. WIP	Primeiro	Segundo	Terceiro	Quarto
Baixo	TPC	CONWIP	Kanban	Reorder Point
Médio	TPC	CONWIP	Kanban	Reorder Point
Alto	TPC	Kanban/CONWIP	Kanban/CONWIP	Reorder Point
CV = 1,0, GD(bxo) e Segmentada				
Desemp. WIP	Primeiro	Segundo	Terceiro	Quarto
Baixo	TPC	Kanban/CONWIP	Kanban	Reorder Point
Médio	TPC	CONWIP	Kanban	Reorder Point
Alto	TPC	Kanban/CONWIP	Kanban/CONWIP	Reorder Point

TABELA 4.20: tabela de desempenho de sistemas de PCP em linhas tipo segmentada com
CV=0,5

CV = 0,5, GD(alt) e Segmentada *				
Desemp. WIP	Primeiro	Segundo	Terceiro	Quarto
Baixo	TPC	Kanban	CONWIP	Reorder Point
Médio	TPC	Kanban	CONWIP	Reorder Point
Alto	TPC	Kanban	CONWIP	Reorder Point
CV = 0,5, GD(méd) e Segmentada				
Desemp. WIP	Primeiro	Segundo	Terceiro	Quarto
Baixo	TPC	CONWIP	Kanban	Reorder Point
Médio	TPC	Kanban/CONWIP	Kanban/CONWIP	Reorder Point
Alto	TPC	Kanban	CONWIP	Reorder Point
CV = 0,5, GD(bxo) e Segmentada *				
Desemp. WIP	Primeiro	Segundo	Terceiro	Quarto
Baixo	TPC	CONWIP	Kanban	Reorder Point
Médio	TPC	CONWIP	Kanban	Reorder Point
Alto	TPC	Kanban	CONWIP	Reorder Point

* A diferença, no entanto, entre os sistemas Kanban e o CONWIP é muito pequena

TABELA 4.21: tabela de desempenho de sistemas de PCP em linhas tipo segmentada com
CV=0,2

CV = 0,2, GD(alt) e Segmentada				
Desemp. WIP	Primeiro	Segundo	Terceiro	Quarto
Baixo	TPC	Kanban/Reorder Point	Kanban/Reorder Point	CONWIP
Médio	TPC/CONWIP/Kanban/ROP	TPC/CONWIP/Kanban/ROP	TPC/CONWIP/Kanban/ROP	TPC/CONWIP/Kanban/ROP
Alto	TPC/CONWIP/Kanban/ROP	TPC/CONWIP/Kanban/ROP	TPC/CONWIP/Kanban/ROP	TPC/CONWIP/Kanban/ROP
CV = 0,2, GD(méd) e Segmentada				
Desemp. WIP	Primeiro	Segundo	Terceiro	Quarto
Baixo	TPC	Kanban	Reorder Point	CONWIP
Médio *	TPC/Kanban/CONWIP	TPC/Kanban/CONWIP	TPC/Kanban/CONWIP	Reorder Point
Alto	TPC/CONWIP/Kanban/ROP	TPC/CONWIP/Kanban/ROP	TPC/CONWIP/Kanban/ROP	TPC/CONWIP/Kanban/ROP
CV = 0,2, GD(bxo) e Segmentada				
Desemp. WIP	Primeiro	Segundo	Terceiro	Quarto
Baixo	TPC	Kanban	CONWIP	Reorder Point
Médio	TPC	Kanban	CONWIP	Reorder Point
Alto *	TPC/Kanban	TPC/Kanban	CONWIP	Reorder Point

* Pode-se dizer, no entanto, que os quatro sistemas estão empatados, pois a diferença entre eles é muito pequena

Alocação em *step*

- Como pode ser observado dos gráficos gerados, é difícil avaliar-se o desempenho do método TPC na alocação *step*. Quando o CV é alto, o nível de WIP correspondente ao ponto formado pelo método TPC está acima dos demais níveis de WIP gerados pelos demais métodos de gestão, não sendo possível uma comparação. Quando CV é mais baixo (0,5 e 0,2), o ponto relacionado ao método TPC coincide com os demais modelos (com exceção à situação onde CV igual a 0,5 e GD é baixo onde, mais uma vez, o ponto gerado pelo TPC está distante dos demais gráficos). Estes resultados podem indicar que o desempenho do método TPC na alocação *step* não se diferencia dos demais métodos quando o CV é baixo e, quando $CV = 1,0$, os resultados não permitem que se extraia uma boa conclusão ao analisar-se o gráfico resultante.
- Nas alocações tipo *step* parece não haver muita diferença entre os sistemas CONWIP e Kanban. Conforme se diminui o CV, ou se aumenta o grau de desbalanceamento, o sistema *Reorder Point* tende a ter um desempenho também muito próximo dos outros dois sistemas de PCP, podendo superá-los em algumas situações. No entanto, a forma como os pontos estão distribuídos nos gráficos não permitem que se extraia boas conclusões.

As tabelas 4.22, 4.23, 4.24 a seguir apresentam os resultados para linhas tipo *step*.

TABELA 4.22: tabela de desempenho de sistemas de PCP em linhas tipo *step* com $CV=1,0$

CV = 1,0, GD(alt) e Step				
Desemp. WIP	Primeiro	Segundo	Terceiro	Quarto
Baixo	Kanban/CONWIP	Kanban/CONWIP	Reorder Point	*
Médio	Kanban/CONWIP	Kanban/CONWIP	Reorder Point	*
Alto	Kanban	CONWIP	Reorder Point	*
CV = 1,0, GD(méd) e Step				
Desemp. WIP	Primeiro	Segundo	Terceiro	Quarto
Baixo	CONWIP	Kanban	Reorder Point	*
Médio	CONWIP/Kanban	CONWIP/Kanban	Reorder Point	*
Alto	Kanban	CONWIP	Reorder Point	*
CV = 1,0, GD(bxo) e Step				
Desemp. WIP	Primeiro	Segundo	Terceiro	Quarto
Baixo	CONWIP	Kanban	Reorder Point	*
Médio	CONWIP/Kanban **	CONWIP/Kanban	Reorder Point	*
Alto	CONWIP/Kanban	CONWIP/Kanban	Reorder Point	*
* O TPC é expresso apenas por um único ponto e numa faixa de valores que não permite comparações				
** Há uma pequena vantagem para o CONWIP nesta situação				

TABELA 4.23: tabela de desempenho de sistemas de PCP em linhas tipo *step* com $CV=0,5$

CV = 0,5, GD(alt) e Step				
Desemp. WIP	Primeiro	Segundo	Terceiro	Quarto
Baixo	CONWIP	Kanban	Reorder Point	*
Médio	Kanban	Reorder Point/CONWIP	Reorder Point/CONWIP	*
Alto	Reorder Point/Kanban	Reorder Point/Kanban	CONWIP	*
CV = 0,5, GD(méd) e Step				
Desemp. WIP	Primeiro	Segundo	Terceiro	Quarto
Baixo	CONWIP	Kanban	Reorder Point	*
Médio	Kanban	CONWIP	Reorder Point	*
Alto **	Reorder Point	Kanban/CONWIP	Kanban/CONWIP	*
CV = 0,5, GD(bxo) e Step				
Desemp. WIP	Primeiro	Segundo	Terceiro	Quarto
Baixo ***	CONWIP/Kanban	CONWIP/Kanban	Reorder Point	*
Médio ***	CONWIP/Kanban	CONWIP/Kanban	Reorder Point	*
Alto	Kanban	CONWIP	Reorder Point	*
* O TPC é expresso apenas por um único ponto e numa faixa de valores que não permite comparações				
** A diferença entre os três sistemas é, todavia, pequena				
*** Talvez haja uma vantagem, ainda que muito pequena, para o CONWIP				

TABELA 4.24: tabela de desempenho de sistemas de PCP em linhas tipo *step* com CV=0,2

CV = 0,2, GD(alt) e Step **				
Desemp. WIP	Primeiro	Segundo	Terceiro	Quarto
Baixo	CONWIP/Kanban/Reorder Point	CONWIP/Kanban/Reorder Point	CONWIP/Kanban/Reorder Point	*
Médio	CONWIP/Kanban/Reorder Point	CONWIP/Kanban/Reorder Point	CONWIP/Kanban/Reorder Point	*
Alto	CONWIP/Kanban/Reorder Point	CONWIP/Kanban/Reorder Point	CONWIP/Kanban/Reorder Point	*
CV = 0,2, GD(méd) e Step ***				
Desemp. WIP	Primeiro	Segundo	Terceiro	Quarto
Baixo	CONWIP	Kanban/Reorder Point	Kanban/Reorder Point	*
Médio	CONWIP	Kanban/Reorder Point	Kanban/Reorder Point	*
Alto	CONWIP	Kanban/Reorder Point	Kanban/Reorder Point	*
CV = 0,2, GD(bxo) e Step				
Desemp. WIP	Primeiro	Segundo	Terceiro	Quarto
Baixo	CONWIP	Kanban	Reorder Point	*
Médio	Kanban	CONWIP	Reorder Point	*
Alto	Kanban	CONWIP/Reorder Point	CONWIP/Reorder Point	*
* O TPC é expresso apenas por um único ponto e numa faixa de valores que não permite comparações				
** Na faixa de valores que o CONWIP gerou resultados, parece haver uma muito pequena vantagem para este				
*** A faixa de valores do CONWIP é, no entanto, muito estreita				

Alocação em V

- Neste tipo de alocação ocorre um fenômeno muito parecido com a alocação segmentada. Pode-se notar pouca diferença de desempenho entre os sistemas Kanban e CONWIP em qualquer nível de CV ou WIP. O sistema TPC, por sua vez, se mostra superior aos demais sistemas de PCP quando o CV é mais alto (1,0), tendendo, no entanto, a se igualar aos demais sistemas de PCP quando o CV diminui para 0,5 e, principalmente, 0,2. O sistema ROP, no entanto, parece nunca superar os demais sistemas de PCP, ainda que a diferença tenda a diminuir com a redução no CV.

As tabelas 4.25, 4.26, 4.27 a seguir apresentam os resultados para linhas em V.

TABELA 4.25: tabela de desempenho de sistemas de PCP em linhas tipo V com $CV=1,0$

CV = 1,0, GD(alt) e V				
Desemp. WIP	Primeiro	Segundo	Terceiro	Quarto
Baixo	TPC	Kanban/CONWIP	Kanban/CONWIP	Reorder Point
Médio	TPC	Kanban/CONWIP	Kanban/CONWIP	Reorder Point
Alto	TPC	Kanban	CONWIP	Reorder Point
CV = 1,0, GD(méd) e V				
Desemp. WIP	Primeiro	Segundo	Terceiro	Quarto
Baixo *	TPC	Kanban/CONWIP	Kanban/CONWIP	Reorder Point
Médio *	TPC	Kanban/CONWIP	Kanban/CONWIP	Reorder Point
Alto	TPC	Kanban	CONWIP	Reorder Point
CV = 1,0, GD(bxo) e V				
Desemp. WIP	Primeiro	Segundo	Terceiro	Quarto
Baixo	TPC	CONWIP	Kanban	Reorder Point
Médio	TPC	CONWIP	Kanban	Reorder Point
Alto	TPC	Kanban/CONWIP	Kanban/CONWIP	Reorder Point

* Talvez haja uma leve vantagem do CONWIP sobre o Kanban nestas condições

TABELA 4.26: tabela de desempenho de sistemas de PCP em linhas tipo V com CV=0,5

CV = 0,5, GD(alt) e V				
Desemp. WIP	Primeiro	Segundo	Terceiro	Quarto
Baixo	TPC	Kanban/CONWIP	Kanban/CONWIP	Reorder Point
Médio	TPC	Kanban	CONWIP	Reorder Point
Alto	TPC	Kanban	CONWIP	Reorder Point

CV = 0,5, GD(méd) e V				
Desemp. WIP	Primeiro	Segundo	Terceiro	Quarto
Baixo	TPC	Kanban	CONWIP	Reorder Point
Médio	TPC	Kanban	CONWIP	Reorder Point
Alto	TPC	Kanban	CONWIP	Reorder Point

CV = 0,5, GD(bxo) e V				
Desemp. WIP	Primeiro	Segundo	Terceiro	Quarto
Baixo	TPC	Kanban/CONWIP	Kanban/CONWIP	Reorder Point
Médio	TPC	Kanban/CONWIP	Kanban/CONWIP	Reorder Point
Alto	TPC	Kanban	CONWIP	Reorder Point

TABELA 4.27: tabela de desempenho de sistemas de PCP em linhas tipo V com CV=0,2

CV = 0,2, GD(alt) e V				
Desemp. WIP	Primeiro	Segundo	Terceiro	Quarto
Baixo *	TPC	Kanban/CONWIP/Reorder Point	Kanban/CONWIP/Reorder Point	Kanban/CONWIP/Reorder Point
Médio **	TPC	Kanban	CONWIP	Reorder Point
Alto **	TPC	Kanban	CONWIP	Reorder Point

CV = 0,2, GD(méd) e V				
Desemp. WIP	Primeiro	Segundo	Terceiro	Quarto
Baixo *	TPC	Kanban/CONWIP	Kanban/CONWIP	Reorder Point
Médio **	TPC	Kanban	CONWIP	Reorder Point
Alto **	TPC	Kanban	CONWIP	Reorder Point

CV = 0,2, GD(bxo) e V				
Desemp. WIP	Primeiro	Segundo	Terceiro	Quarto
Baixo	TPC	Kanban/CONWIP	Kanban/CONWIP	Reorder Point
Médio	TPC	Kanban	CONWIP	Reorder Point
Alto	TPC	Kanban	CONWIP	Reorder Point

* Há na realidade inversões de posições entre os sistemas CONWIP, Kanban e JIC, o que dificulta uma afirmação mais acurada

** A diferença entre os sistemas Kanban e CONWIP é, no entanto, muito pequena

4.4.2 Análise dos resultados baseada na hipótese 2

Hipótese 2: os desempenhos dos diversos tipos de sistemas de gestão da produção variam significativamente segundo o tipo de configuração de distribuição de capacidades entre recursos empregado.

✓ Discussões em torno do nível máximo de WIP

Relembrando, mais uma vez, o sistema TPC não será aqui considerado

CONWIP

- As melhores formas de alocação desbalanceada em sistemas CONWIP com variabilidade baixa ($CV = 0,2$) é V ($GD_{(bso)}$), bowl ($GD_{(bso)}$) e alternado ($GD_{(bso)}$), nesta ordem, para níveis de WIP variando de médio a alto (9, 13 e 17). Para um nível de WIP baixo(5), o tipo alternado é substituído pelo segmentado, e para WIP igual a 7, o tipo alternado é substituído pelo linear crescente, com os formatos V e bowl se mantendo nas primeiras posições em ambos os casos.
- O formato V ($GD_{(bso)}$) continua sendo a melhor forma de alocação desbalanceada, para sistemas CONWIP, quando a variabilidade é 0,5. Apenas quando o nível de WIP é médio(9) a alocação tipo V é superada pela linear crescente, que por sua vez é a segunda melhor nos níveis de WIP mais altos (13 e 17).
- Quando a variabilidade é alta ($CV = 1,0$), o formato V ($GD_{(bso)}$) se mantém como preferível, dentre as configurações desbalanceadas, para sistemas tipo CONWIP. Apenas quando o nível de WIP é baixo (5) o formato V ($GD_{(bso)}$) é superado pelo alternado. A tabela 12.7 apresenta os resultados para o sistema CONWIP com CV igual a 1,0.

As tabelas B28 a B30 do anexo B mostram os resultados obtidos para o sistema CONWIP com variabilidades iguais a 0,2, 05 e 1,0, respectivamente.

Kanban

- Os sistemas Kanban com 1 cartão por recurso têm throughput idêntico aos sistemas ROP com permissão de estocagem de no máximo 1 unidade de WIP entre recursos. Este resultado já era esperado, pois, para um nível de WIP igual a 5, a alocação de cartões kanbans entre recursos é idêntica à distribuição de permissão de estocagem para o ROP, ou seja, alocação na forma (1,1,1,1,1).
- Os sistemas Kanban com 1 cartão funcionam melhor em linhas tipo bowl do que em linhas balanceadas.
- Para níveis altos de WIP, os sistemas Kanban tendem a funcionar melhor em linhas balanceadas, principalmente quando o CV é baixo. Com variabilidade alta ($CV = 1,0$), por exemplo, a vantagem da linha balanceada é pequena em relação à configuração bowl com baixo grau de desbalanceamento.
- Para níveis de WIP mais baixos (≤ 9), as linhas Kanban possuem melhor desempenho em linhas balanceadas apenas quando a variabilidade é baixa ($CV=0,2$). Para variabilidades mais altas ($CV=1,0$ ou $0,5$), o sistema Kanban parece funcionar melhor com a configuração tipo bowl ($GD_{(bowl)}$) com níveis de WIP relativamente baixos (≤ 9).

Mais especificamente, para variabilidades altas ($1,0$) e WIP relativamente baixo (≤ 9), os sistemas Kanban em linhas com formatos linear decrescente ($GD_{(lwo)}$), alternado ($GD_{(lwo)}$) e bowl ($GD_{(lwo)}$), superam em desempenho as linhas balanceadas.

Para variabilidades médias ($CV = 0,5$) e WIP ainda relativamente baixo (9), os sistemas Kanban funcionaram melhor em linhas balanceadas, com exceção do formato linear decrescente, que foi melhor.

Estas conclusões são interessantes, pois confirmam a busca constante, e concomitante, nos sistemas tipo Kanban, por uma redução da variabilidade dos tempos de processamento dos recursos (através das diversas ferramentas da Qualidade Total), redução no nível de WIP e pelo perfeito balanceamento das linhas de produção.

- As melhores formas de alocação desbalanceada em sistemas Kanban com variabilidade baixa ($CV=0,2$) para quase todos os níveis de WIP (7, 9, 13 e 17) parecem ser as formas V ($GD_{(bxo)}$), bowl ($GD_{(bxo)}$) e alternado ($GD_{(bxo)}$). Quando o nível de WIP é baixo (5), no entanto, o formato V cede lugar ao *step* ($GD_{(bxo)}$).

As tabelas B31 a B33 do anexo B mostram os resultados obtidos para o sistema Kanban com variabilidades iguais a 0,2, 05 e 1,0, respectivamente.

Reorder Point

- De maneira geral, os sistemas tipo ROP parecem funcionar melhor em linhas tipo bowl ($GD_{(bxo)}$) do que qualquer outra forma de alocação desbalanceada de capacidades com baixo grau de desbalanceamento. A exceção fica por conta do desempenho apresentado com nível de WIP = 7. Neste caso, quando as variabilidades do sistema foram 0,2 e 0,5, duas outras configurações se mostraram superiores ao bowl: configurações em V e segmentada. Para um CV alto (1,0), no entanto, apenas a configuração segmentada superou a configuração bowl. A justificativa para este fato está provavelmente relacionada à maneira como os estoques, no nível de WIP = 7, foram distribuídos, já que estes, ao se concentrarem no centro da linha, proporcionaram melhor proteção aos recursos gargalos das linhas em V e segmentada, em ambos os casos localizados na terceira posição.

Talvez se possa afirmar, contudo, que a alocação *bowl* é a melhor opção para sistemas ROP quando seus estoques são distribuídos de maneira homogênea ou igualitária entre os recursos da linha. Sem esta premissa, o desempenho de alocações tipo *bowl* em linhas ROP fica prejudicado, ou ao menos deixa de ser a melhor opção, como pode ser visto comparando-se os desempenhos dentre as diversas alternativas quando o nível de WIP foi sete.

- Em linhas com alta variabilidade (1,0), os melhores desempenhos das alocações de capacidades em linhas ROP ocorreram nos formatos bowl ($GD_{(bxo)}$), $GD_{(méd)}$, $GD_{(alt)}$ e *step* ($GD_{(bxo)}$), nesta ordem. A alocação balanceada é a terceira melhor opção nestas condições. Mais uma vez, a exceção ficou por conta do desempenho do sistema quando WIP = 7. Neste caso, a configuração segmentada foi a que melhor desempenho apresentou.

- Para níveis de variabilidade altos ($CV = 1,0$ e $0,5$), os sistemas ROP em linhas bowl e grau de desbalanceamento baixo, superam os sistemas ROP em linhas balanceadas para quaisquer níveis de WIP, com exceção, uma vez mais, ao ponto onde $WIP = 7$. A vantagem da linha bowl se mostra ainda maior com variabilidades altas ($CV = 1,0$). Este resultado corrobora com os estudos conduzidos sobre o fenômeno bowl, o qual afirma ser este preferível em ambientes com altos níveis de CV.
- Para níveis de variabilidades baixos ($0,2$), o melhor desempenho das linhas ROP ocorreram nas linhas balanceadas quando o nível de WIP é alto. Há uma tendência, no entanto, das linhas tipo bowl alcançarem e até mesmo superarem as linhas balanceadas quando o nível de WIP diminui em sistemas ROP e o grau de desbalanceamento é baixo. Novamente, estas conclusões estão de acordo com trabalhos relacionados com o fenômeno bowl, que também afirmam ser o fenômeno mais presente quando o nível de WIP é baixo.

Vale ressaltar que quando o nível de WIP = 7 ($CV = 0,2$ e grau de desbalanceamento baixo), as configurações em V e segmentada, pelas razões já mencionadas, superam não só a configuração *bowl*, mas também a alocação balanceada.

- Em linhas com média variabilidade ($CV = 0,5$), as linhas ROP continuam tendo um desempenho melhor com o formato bowl ($GD_{(bowl)}$) em quaisquer níveis de WIP. Ainda com média variabilidade ($CV = 0,5$), o formato *step* ($GD_{(step)}$), mesmo inferior ao bowl ($GD_{(bowl)}$), apresentou desempenho superior ao balanceado quando o nível de WIP é baixo (5 e 9).
- Quando a variabilidade é baixa ($CV = 0,2$), a melhor forma de alocação desbalanceada continua sendo a bowl para sistemas ROP com distribuição igualitária de WIP entre os recursos da linha. No entanto, apenas quando o nível de WIP é 5 ela supera a alocação balanceada.

As tabelas B34 a B36 do anexo B mostram os resultados obtidos para o sistema ROP com variabilidades iguais a 0,2, 0,5 e 1,0, respectivamente.

✓ Discussões em torno do nível médio de WIP

CONWIP

CV = 1,0 e GD_(alt)

- A alocação em *step* apresentou o melhor resultado quando o nível de WIP foi baixo ou médio. Esta, no entanto, não pôde ser analisada para níveis mais altos de WIP. Em seguida, apareceram as alocações tipo linear crescente, bowl, balanceada e em V. Pode-se notar, no entanto, uma leve tendência da alocação linear crescente superar a balanceada quando o WIP é baixo e invertendo-se a situação quando o nível de WIP é alto. As alocações bowl e em V também apresentaram bons resultados.

CV = 1,0 e GD_(méd)

- A alocação em *step* obteve o melhor resultado. Em seguida aparecem as alocações tipo linear crescente, bowl e balanceada, porém com pequenas diferenças entre elas.

CV = 1,0 e GD_(bxo)

- A diferença entre as alocações é muito pequena. Ainda que se possa observar uma reduzida vantagem para a alocação em *step*, esta diferença se mostra insignificante.

CV = 0,5 e GD_(alt)

- Apesar do intervalo bastante pequeno de variação no nível de WIP médio aferido, a alocação em *step* se mostrou a melhor opção em sua faixa de valores. Em seguida, aparece a alocação balanceada, porém com desempenhos semelhantes à alocação linear crescente quando o nível de WIP médio ainda é baixo. A alocação bowl aparece na quarta posição. Com o aumento no nível de WIP, a alocação balanceada se torna a melhor opção, vindo em seguida a alocação bowl, V e alternada.

CV = 0,5 e GD_(méd)

- Dentro da faixa de valores obtidos para a alocação em *step*, esta apresentou os melhores resultados, seguida pela alocação linear crescente, em segundo lugar. A

seguir, aparecem as alocações em bowl e balanceada. Aumentando o nível de WIP, há uma tendência da alocação balanceada se tornar a preferível, vindo em seguida as alocações linear crescente e bowl como as melhores opções, dependendo do nível de WIP observado.

CV = 0,5 e $GD_{(bxo)}$

- Há muito pouca diferença entre os diversos critérios de alocações de capacidades produtivas quando o nível de WIP médio medido é baixo. Ao se aumentar o WIP, no entanto, pode-se perceber uma leve vantagem para a alocação em *step*, com a alocação linear crescente em segundo lugar. As alocações em bowl e balanceada aparecem basicamente empatadas no terceiro lugar, considerando níveis mais altos de WIP médio.

CV = 0,2 e $GD_{(all)}$

- É difícil fazer-se uma análise comparativa das alocações em *step* e linear crescente devido à faixa de valores apresentados. Das demais alocações, no entanto, pode-se perceber uma certa vantagem da alocação balanceada, com a alocação em V em segundo.

CV = 0,2 e $GD_{(méd)}$

- Valem as mesmas observações citadas para o caso anterior. Porém, a alocação linear crescente se apresenta agora em segundo lugar na pequena faixa de valores observados.

CV = 0,2 e $GD_{(bxo)}$

- Dentro da faixa de valores apresentados para a configuração em *step*, esta se apresentou com uma pequena vantagem sobre as demais. A partir desta faixa, entretanto, pode-se perceber uma vantagem da alocação balanceada, devendo-se ainda notar que a alocação linear crescente ficou muito próxima da alocação balanceada, até mesmo superando-a quando o nível de WIP médio no sistema foi mais baixo. Em níveis mais altos de WIP as alocações em V e bowl apareceram como as melhores opções depois da alocação balanceada.

As tabelas 4.28, 4.29 e 4.30 ajudam a sintetizar as afirmações acima citadas sobre o sistema CONWIP.

TABELA 4.28: quadro de desempenho de diversas alocações de capacidades sob o sistema CONWIP com $CV = 1,0$

CV = 1,0, GD(alt) e CONWIP				
Desemp. WIP	Primeiro	Segundo	Terceiro	Quarto
Baixo	Step	Linear Crescente	Bowl	Balanceada
Médio	Step	Linear Crescente	Balanceada	Bowl
Alto	Balanceada	Linear Crescente	Bowl	V
CV = 1,0, GD(méd) e CONWIP				
Desemp. WIP	Primeiro	Segundo	Terceiro	Quarto
Baixo	Step	Linear Crescente	Bowl	Balanceada
Médio	Step	Linear Crescente	Bowl	Balanceada
Alto	Step	Linear Crescente	Balanceada	Bowl
CV = 1,0, GD(bxo) e CONWIP				
Desemp. WIP	Primeiro	Segundo	Terceiro	Quarto
Baixo *	Step	Linear Crescente	Bowl	Balanceada
Médio *	Step	Linear Crescente	Bowl	Balanceada
Alto	Step	Linear Crescente	Bowl	Balanceada

* Há, no entanto, pouca diferença entre os sistemas Balanceado e Segmentado nestas situações

TABELA 4.29: quadro de desempenho de diversas alocações de capacidades sob o sistema CONWIP com $CV = 0,5$

CV = 0,5, GD(alt) e CONWIP				
Desemp. WIP	Primeiro	Segundo	Terceiro	Quarto
Baixo *	Step	Balanceada	Linear Crescente	Bowl
Médio	Balanceada	Bowl	V	Alternada
Alto	Balanceada	Bowl	V	Alternada
CV = 0,5, GD(méd) e CONWIP				
Desemp. WIP	Primeiro	Segundo	Terceiro	Quarto
Baixo	Step	Linear Crescente	Bowl/Balanceada	Bowl/Balanceada
Médio	Balanceada	Linear Crescente	Bowl	V
Alto	Balanceada	Bowl	V	Alternada
CV = 0,5, GD(bxo) e CONWIP				
Desemp. WIP	Primeiro	Segundo	Terceiro	Quarto
Baixo	Step	Linear Crescente	Bowl	Balanceada/Segmentada
Médio	Step	Linear Crescente	Bowl	Balanceada
Alto	Step	Linear Crescente	Bowl	Balanceada

* A alocação em Step teve, no entanto, uma faixa de valores relativamente pequena

TABELA 4.30: quadro de desempenho de diversas alocações de capacidades sob o sistema CONWIP com $CV = 0,2$

CV = 0,2, GD(alt) e CONWIP				
Desemp. WIP	Primeiro	Segundo	Terceiro	Quarto
Baixo *	Balanceada	V	Bowl	Alternada
Médio	Balanceada	V	Bowl	Alternada
Alto	Balanceada	V	Alternada	Linear Decrescente
CV = 0,2, GD(méd) e CONWIP				
Desemp. WIP	Primeiro	Segundo	Terceiro	Quarto
Baixo **	Balanceada	Linear Crescente	Bowl	V
Médio	Balanceada	V	Bowl	Alternada
Alto	Balanceada	V	Alternada	Linear Decrescente
CV = 0,2, GD(bxo) e CONWIP				
Desemp. WIP	Primeiro	Segundo	Terceiro	Quarto
Baixo	Step	Linear Crescente	Bowl	Balanceada
Médio	Balanceada	Linear Crescente	Bowl	V
Alto	Balanceada	V/Bowl	V/Bowl	Alternada

* As alocações em Step e Linear Crescente não puderam ser efetivamente comparadas com as demais devido à faixa de valores gerados

** A alocação em Step teve, no entanto, uma faixa de valores relativamente pequena

Kanban**CV = 1,0 e $GD_{(alt)}$**

- As alocações que melhores desempenhos tiveram foram a *step* e a linear crescente, com leve vantagem para a *step*. Em terceiro lugar aparece a alocação balanceada, seguida pela alocação tipo bowl em quarto. Pode-se perceber que a alocação tipo bowl, no entanto, apresenta desempenho similar à alocação balanceada em níveis mais baixos de WIP.

CV = 1,0 e $GD_{(méd)}$

- As alocações em *step* e linear crescente foram as que melhores resultados apresentaram, com empate entre elas. Em terceiro e quarto lugares, também empatadas, apareceram as alocações balanceadas e em bowl. Em níveis mais altos de WIP as alocações *step* e linear crescente deixam de apresentar valores para o gráfico, ficando as alocações balanceada, bowl, segmentada e em V, nesta ordem, como as melhores opções.

CV = 1,0 e $GD_{(bto)}$

- A diferença de desempenho entre as estratégias diminui bastante quando o grau de desbalanceamento é baixo. Porém, pode-se ainda notar uma leve vantagem para as alocações em *step* e linear crescente, com um empate entre elas, ficando a alocação em bowl ligeiramente atrás, em terceiro lugar.

CV = 0,5 e $GD_{(alt)}$

- Mais uma vez a alocação em *step* se configura como preferível, apesar da pequena faixa de resultados apresentados. Nota-se, no entanto, que a configuração linear crescente está muito próxima dentro desta faixa. Ao se aumentar o nível médio de WIP no sistema, a alocação balanceada se torna a melhor opção, com as alocações em V e bowl vindas em seguida.

CV = 0,5 e $GD_{(méd)}$

- Dentro da faixa de valores obtidos para a alocação em *step*, esta apresentou os melhores resultados, seguida pela alocação linear crescente, em segundo lugar. A

seguir, aparecem as alocações balanceada e em bowl. Aumentando o nível de WIP, há uma tendência da alocação balanceada se tornar a preferível, vindo em seguida as alocações bowl e em V como as melhores opções.

CV = 0,5 e $GD_{(bxo)}$

- A redução no grau de desbalanceamento parece aumentar a faixa de valores alcançados pela alocação em *step*, assim como também para a alocação linear crescente. O que não muda, porém, é o fato que estas duas configurações se mantêm como as que melhores resultados apresentaram, com diferenças quase nulas entre ambas. Em terceiro lugar aparecem, com pequenas diferenças entre elas, as alocações em bowl, balanceada e segmentada.

CV = 0,2 e $GD_{(alt)}$

- É difícil fazer-se uma análise comparativa das alocações em *step* e linear crescente devido à faixa de valores apresentados. Das demais alocações, no entanto, pode-se perceber uma certa vantagem da alocação balanceada, seguida das alocações em V e bowl. Para níveis mais altos de WIP a alocação alternada surge como a terceira opção, atrás da alocação em V.

CV = 0,2 e $GD_{(méd)}$

- Valem as mesmas observações citadas para o caso anterior.

CV = 0,2 e $GD_{(bxo)}$

- Dentro da faixa de valores apresentados para a configuração em *step*, esta se apresenta, ao lado da configuração linear crescente, com uma boa vantagem sobre as demais. A partir desta faixa, entretanto, pode-se perceber uma clara vantagem da alocação balanceada, acompanhada pela alocação linear crescente, cuja curva ainda se alonga um pouco além da alocação em *step*. A vantagem da alocação balanceada sobre as demais tende a aumentar com o aumento dos níveis de WIP médios no sistema.

As tabelas 4.31, 4.32 e 4.33 ajudam a sintetizar as afirmações acima citadas sobre o sistema Kanban.

TABELA 4.31: quadro de desempenho de diversas alocações de capacidades sob o sistema Kanban com $CV = 1,0$

CV = 1,0, GD(alt) e Kanban				
Desemp. WIP	Primeiro	Segundo	Terceiro	Quarto
Baixo	Step	Linear Crescente	Balanceada/Bowl	Balanceada/Bowl
Médio	Step	Linear Crescente	Balanceada	Bowl
Alto	Balanceada	Bowl	V	Segmentada
CV = 1,0, GD(méd) e Kanban				
Desemp. WIP	Primeiro	Segundo	Terceiro	Quarto
Baixo	Step/Linear Crescente	Step/Linear Crescente	Bowl	Balanceada
Médio	Step	Linear Crescente	Balanceada/Bowl	Balanceada/Bowl
Alto	Balanceada	Bowl	Segmentada	V
CV = 1,0, GD(bxo) e Kanban				
Desemp. WIP	Primeiro	Segundo	Terceiro	Quarto
Baixo	Step/Linear Crescente	Step/Linear Crescente	Bowl	Balanceada/Segmentada
Médio	Step/Linear Crescente	Step/Linear Crescente	Bowl	Balanceada/Segmentada
Alto	Step/Linear Crescente	Step/Linear Crescente	Bowl	Balanceada/Segmentada

TABELA 4.32: quadro de desempenho de diversas alocações de capacidades sob o sistema Kanban com $CV = 0,5$

CV = 0,5, GD(alt) e Kanban				
Desemp. WIP	Primeiro	Segundo	Terceiro	Quarto
Baixo *	Step	Linear Crescente	Balanceada	Bowl
Médio	Balanceada	Bowl	V	Alternada
Alto	Balanceada	V	Bowl	Alternada
CV = 0,5, GD(méd) e Kanban				
Desemp. WIP	Primeiro	Segundo	Terceiro	Quarto
Baixo	Step	Linear Crescente	Balanceada	Bowl
Médio	Linear Crescente	Balanceada	Bowl	V
Alto	Balanceada	Bowl	V	Alternada
CV = 0,5, GD(bxo) e Kanban				
Desemp. WIP	Primeiro	Segundo	Terceiro	Quarto
Baixo	Step/Linear Crescente	Step/Linear Crescente	Bowl	Balanceada/Segmentada
Médio	Step/Linear Crescente	Step/Linear Crescente	Bowl/Balanceada	Bowl/Balanceada
Alto	Step/Linear Crescente	Step/Linear Crescente	Bowl/Balanceada	Bowl/Balanceada

* As alocações em Step e Linear Crescente tiveram, no entanto, uma faixa de valores relativamente pequena

TABELA 4.33: quadro de desempenho de diversas alocações de capacidades sob o sistema Kanban com $CV = 0,2$

CV = 0,2, GD(alt) e Kanban				
	Primeiro	Segundo	Terceiro	Quarto
Baixo *	Balanceada	Bowl/V	Bowl/V	Alternada
Médio	Balanceada	V	Bowl	Alternada
Alto	Balanceada	V	Alternada	Linear Decrescente
CV = 0,2, GD(méd) e Kanban				
	Primeiro	Segundo	Terceiro	Quarto
Baixo **	Step	Linear Crescente	Balanceada	Bowl
Médio	Balanceada	V	Bowl	Alternada
Alto	Balanceada	V	Alternada	Linear Decrescente
CV = 0,2, GD(bxo) e Kanban				
Desemp. WIP	Primeiro	Segundo	Terceiro	Quarto
Baixo	Step	Linear Crescente	Bowl	Balanceada
Médio	Balanceada	Linear Crescente	Bowl	V
Alto	Balanceada	V	Bowl	Alternada
* As alocações em Step e Linear Crescente não puderam ser efetivamente comparadas com as demais devido à faixa de valores gerados				
** As alocações em Step e Linear Crescente tiveram, no entanto, uma faixa de valores relativamente pequena				

Reorder Point

CV = 1,0 e GD_(alt)

- As alocações que melhores desempenhos obtiveram foram a *step* e a linear crescente. Alocação em *step* tende a ganhar vantagem sobre a linear crescente conforme se aumenta o nível de WIP médio no sistema. Em níveis baixos e médios de WIP, as alocações tipo balanceada e bowl ficaram em terceiro lugar, com desempenhos muito próximos. A alocação balanceada, por sua vez, tende a ter desempenho superior à alocação bowl quando o nível de WIP aumenta.

CV = 1,0 e GD_(méd)

- Mais uma vez, as alocações em *step* e linear crescente obtiveram os melhores resultados. Em terceiro lugar aparece a alocação tipo bowl, com leve vantagem

sobre a alocação balanceada em quarto. Ao se aumentar os níveis de WIP, as alocações linear crescente e *step* deixam de apresentar resultados e as alocações bowl e balanceada passam a ter os melhores resultados, seguidas pelas alocações segmentada e em V.

CV = 1,0 e $GD_{(bxo)}$

- A diferença de desempenho entre as estratégias diminui bastante quando o grau de desbalanceamento é baixo. Porém, pode-se ainda notar uma leve vantagem para as alocações linear crescente e em *step*, com um empate entre elas, ficando a alocação em bowl ligeiramente atrás, em terceiro lugar.

CV = 0,5 e $GD_{(alt)}$

- As alocações em *step* e linear crescente continuam apresentando os melhores resultados. Há, no entanto, um intervalo relativamente pequeno de valores de WIP medidos, principalmente no que tange à alocação em *step*. A alocação balanceada aparece em terceiro lugar e a alocação bowl em quarto. Aumentando-se o nível de WIP as alocações em *step* e linear crescente deixam de apresentar resultados e a alocação balanceada passa a ser a melhor alternativa. As alocações bowl, em V e alternada, nesta ordem, aparecem, em seguida, como as melhores opções.

CV = 0,5 e $GD_{(méd)}$

- Há um aumento nas faixas de valores alcançados pelas alocações em *step* e linear crescente. Dentro desta faixa, ambas apresentaram os melhores resultados. Comparando apenas as demais alocações de capacidades, verifica-se que a alocação em bowl se mostra preferível quando o nível de WIP é medido no ponto de WIP máximo igual a 5. A partir deste ponto, no entanto, a alocação balanceada se mostra com vantagens sobre as demais, ficando a alocação em bowl em segundo lugar.

CV = 0,5 e $GD_{(bxo)}$

- A redução no grau de desbalanceamento parece aumentar a faixa de valores alcançados pela alocação em *step*, assim como também para a alocação linear crescente. O que não muda, porém, é o fato que estas duas configurações se mantêm

como as que melhores resultados apresentaram, com diferenças quase nulas entre ambas. Em terceiro lugar aparecem, novamente com pequenas diferenças entre elas, as alocações em bowl, balanceada, segmentada e em V.

CV = 0,2 e GD_(alt)

- É difícil fazer-se uma análise comparativa das alocações em *step* e linear crescente devido à faixa de valores apresentados. Das demais alocações, no entanto, pode-se perceber uma certa vantagem da alocação balanceada, seguida das alocações em V e bowl. Para níveis mais altos de WIP a alocação alternada surge como a terceira opção, atrás da alocação em V.

CV = 0,2 e GD_(méd)

- A alocação *step* empata com a alocação linear crescente na faixa de valores baixos de WIP médio, ficando em primeiro lugar ao se aumentar um pouco o nível de WIP observado. Para as demais curvas, há uma aparente vantagem para as alocações balanceadas, V e bowl sobre as demais.

CV = 0,2 e GD_(bto)

- As alocações em *step* e linear crescente apresentaram os melhores resultados, com pequenas alternâncias entre ambas. Dentre as demais configurações, nota-se um alto equilíbrio entre as alocações tipo balanceada, em V, segmentada e em bowl, para níveis mais baixos de WIP. Ao se aumentar, no entanto, os níveis médios de WIP no sistema, a alocação balanceada tende a se sobressair, ficando a bowl em segundo lugar.

As tabelas 4.34, 4.35 e 4.36 ajudam a sintetizar as afirmações acima citadas sobre o sistema *Reorder Point*.

TABELA 4.34: quadro de desempenho de diversas alocações de capacidades sob o sistema
Reorder Point com $CV = 1,0$

CV = 1,0, GD(alt) e Reorder Point				
Desemp. WIP	Primeiro	Segundo	Terceiro	Quarto
Baixo	Linear Crescente e Step	Linear Crescente e Step	Balanceada	Bowl
Médio	Linear Crescente e Step	Linear Crescente e Step	Balanceada/Bowl	Balanceada/Bowl
Alto	Balanceada	Bowl	Segmentada	V/Alternada
CV = 1,0, GD(méd) e Reorder Point				
Desemp. WIP	Primeiro	Segundo	Terceiro	Quarto
Baixo	Linear Crescente	Step	Bowl	Balanceada
Médio	Step	Linear Crescente	Bowl	Balanceada
Alto	Bowl	Balanceada	Segmentada	V
CV = 1,0, GD(bxo) e Reorder Point				
Desemp. WIP	Primeiro	Segundo	Terceiro	Quarto
Baixo	Linear Crescente	Step	Bowl/Balanceada/V/Segmentada	Bowl/Balanceada/V/Segmentada
Médio	Linear Crescente/Step	Linear Crescente/Step	Bowl	Balanceada
Alto	Linear Crescente/Step	Linear Crescente/Step	Bowl	Balanceada

TABELA 4.35: quadro de desempenho de diversas alocações de capacidades sob o sistema
Reorder Point com $CV = 0,5$

CV = 0,5, GD(alt) e Reorder Point				
Desemp. WIP	Primeiro	Segundo	Terceiro	Quarto
Baixo	Step	Linear Crescente	Balanceada	Bowl
Médio *	Balanceada	Bowl	V	Alternada
Alto *	Balanceada	Bowl	V	Alternada
CV = 0,5, GD(méd) e Reorder Point				
Desemp. WIP	Primeiro	Segundo	Terceiro	Quarto
Baixo	Linear Crescente/Step	Linear Crescente/Step	Balanceada	Bowl/Segmentada
Médio	Linear Crescente	Balanceada	Bowl	V/Segmentada/Alternada
Alto	Balanceada	Bowl	V/Alternada	V/Alternada
CV = 0,5, GD(bxo) e Reorder Point				
Desemp. WIP	Primeiro	Segundo	Terceiro	Quarto
Baixo **	Linear Crescente	Step	Segmentada	Bowl
Médio	Linear Crescente/Step	Linear Crescente/Step	Bowl	Balanceada
Alto	Linear Crescente/Step	Linear Crescente/Step	Bowl	Balanceada

TABELA 4.36: quadro de desempenho de diversas alocações de capacidades sob o sistema
Reorder Point com $CV = 0,2$

CV = 0,2, GD(alt) e Reorder Point				
Desemp. WIP.	Primeiro	Segundo	Terceiro	Quarto
Baixo *	Balanceada	V	Bowl	Alternada
Médio	Balanceada	V	Bowl	Alternada
Alto	Balanceada	V	Alternada	Linear Decrescente
CV = 0,2, GD(méd) e Reorder Point				
Desemp. WIP	Primeiro	Segundo	Terceiro	Quarto
Baixo **	Step	Linear Crescente	Balanceada	V
Médio	Balanceada	V	Bowl	Alternada
Alto	Balanceada	V	Bowl	Alternada
CV = 0,2, GD(bxo) e Reorder Point				
Desemp. WIP	Primeiro	Segundo	Terceiro	Quarto
Baixo ***	Linear Crescente/Step	Linear Crescente/Step	Segmentada	Balanceada
Médio	Linear Crescente	Balanceada	Bowl	V/Alternada
Alto	Balanceada	Bowl	V	Alternada
* As alocações em Step e Linear Crescente não puderam ser efetivamente comparadas com as demais devido à faixa de valores gerados				
** As alocações em Step e Linear Crescente tiveram, no entanto, uma faixa de valores relativamente pequena				
*** As alocações Segmentada, Balanceada, Bowl e V também tiveram desempenhos relativamente similares				

Tambor-Pulmão-Corda

GD_(alt)

- Quando o grau de desbalanceamento é alto, a alocação segmentada supera a alocação em V apenas quando $CV = 1,0$ e o nível de WIP é baixo ou médio. Com $CV = 0,5$ e $CV = 0,2$, as alocações segmentada e em V têm desempenhos semelhantes com WIP baixo, porém com amplo predomínio da alocação em V para níveis mais altos de WIP.

GD_(méd)

- Quando o grau de desbalanceamento é médio, a alocação segmentada é superior à alocação em V, sob quaisquer níveis de WIP quando o $CV = 1,0$. Quando o $CV = 0,5$, a alocação segmentada parece ter alguma vantagem sob a alocação em V apenas quando o nível de WIP é baixo, porém é superada quando o nível de WIP é mais alto. Com $CV = 0,2$, a diferença entre ambas fica muito pequena quando o nível de

WIP é baixo, tendo a alocação em V melhores resultados quando o nível de WIP aumenta.

$GD_{(bxo)}$

- Quando o grau de desbalanceamento é baixo, a alocação segmentada é superada pela alocação em V apenas quando o $CV = 0,2$. Ainda assim, com $CV = 0,2$ e WIP baixo, ambas as políticas têm desempenho muito próximos.

As tabelas 4.37, 4.38 e 4.39 ajudam a sintetizar as afirmações acima citadas sobre o sistema Tambor-Pulmão-Corda.

TABELA 4.37: quadro de desempenho de diversas alocações de capacidades sob o sistema TPC com $CV=1,0$

CV = 1,0, GD(alt) e Tambor-Pulmão-Corda				
Desemp. WIP	Primeiro	Segundo	Terceiro	Quarto
Baixo	Segmentada	V	*	*
Médio	Step	Segmentada	V	*
Alto	LC	V	Segmentada	*
CV = 1,0, GD(méd) e Tambor-Pulmão-Corda				
Desemp. WIP	Primeiro	Segundo	Terceiro	Quarto
Baixo	Segmentada	V	*	*
Médio	Segmentada	V	*	*
Alto	Step	Segmentada	V	*
CV = 1,0, GD(bxo) e Tambor-Pulmão-Corda				
Desemp. WIP	Primeiro	Segundo	Terceiro	Quarto
Baixo	Segmentada	V	*	*
Médio	Segmentada	V	*	*
Alto	Segmentada	V	*	*

TABELA 4.38: quadro de desempenho de diversas alocações de capacidades sob o sistema TPC
com CV=0,5

CV = 0,5, GD(alt) e Tambor-Pulmão-Corda				
Desemp. WIP	Primeiro	Segundo	Terceiro	Quarto
Baixo	Step	V/Segmentada	V/Segmentada	*
Médio	LC	V	Segmentada	*
Alto	V	Segmentada	*	*
CV = 0,5, GD(méd) e Tambor-Pulmão-Corda				
Desemp. WIP	Primeiro	Segundo	Terceiro	Quarto
Baixo	Step	Segmentada	V	*
Médio	LC	V	Segmentada	*
Alto	V	Segmentada	*	*
CV = 0,5, GD(bxo) e Tambor-Pulmão-Corda				
Desemp. WIP	Primeiro	Segundo	Terceiro	Quarto
Baixo	Segmentada	V	*	*
Médio	Segmentada	V	*	*
Alto	Step	Segmentada	V	*

TABELA 4.39: quadro de desempenho de diversas alocações de capacidades sob o sistema TPC
com CV=0,2

CV = 0,2, GD(alt) e Tambor-Pulmão-Corda				
Desemp. WIP	Primeiro	Segundo	Terceiro	Quarto
Baixo	Step/LC	Step/LC	V	Segmentada
Médio	V	Segmentada	*	*
Alto	V	Segmentada	*	*
CV = 0,2, GD(méd) e Tambor-Pulmão-Corda				
Desemp. WIP	Primeiro	Segundo	Terceiro	Quarto
Baixo	Step/LC	Step/LC	V/Segmentada	V/Segmentada
Médio	V	Segmentada	*	*
Alto	V	Segmentada	*	*
CV = 0,2, GD(bxo) e Tambor-Pulmão-Corda				
Desemp. WIP	Primeiro	Segundo	Terceiro	Quarto
Baixo	Step	Segmentada	V	*
Médio	LC	V	Segmentada	*
Alto	V	Segmentada	*	*

4.4.3 Análise dos resultados baseada na hipótese 3

Hipótese 3: existe uma combinação ótima “configuração de distribuição de capacidades” x “sistemas de gestão da produção”, dentro do escopo aqui estudado, que maximize a taxa de produção em quaisquer circunstâncias.

✓ Discussões em torno do nível máximo de WIP

Por uma questão de organização, este tópico abordará suas discussões segundo diversas combinações de coeficiente de variabilidade e grau de desbalanceamento. Objetiva-se, assim, dado um CV e um GD, qual combinação PCP/alocação obteve os melhores desempenhos. Os seguintes resultados foram verificados.

CV = 1,0 e GD_(alt)

- A alocação balanceada aplicada ao sistema CONWIP foi sempre a melhor opção em todos os níveis de WIP pesquisados. Pode-se verificar também que com o aumento no WIP a alocação balanceada passa a ser ainda a segunda melhor opção, agora aplicada ao sistema Kanban. Merecem destaque também as alocações em V e bowl, nesta ordem e aplicadas sempre ao sistema CONWIP.

A tabela B37 do anexo B ilustra os resultados.

CV = 1,0 = 2 e GD_(méd)

- A alocação balanceada aplicada ao sistema CONWIP foi sempre a melhor opção em todos os níveis de WIP pesquisados. Bons resultados também foram obtidos com as alocações em V e bowl, nesta ordem, sempre aplicadas ao sistema CONWIP. Deve-se frisar que, no entanto, a diminuição no nível de desbalanceamento fez com que diminuísse o predomínio das alocações balanceadas.

A tabela B38 do anexo B apresenta os resultados.

CV = 1,0 e GD_(bxo)

- A alocação balanceada aplicada ao sistema CONWIP foi sempre a melhor opção em todos os níveis de WIP pesquisados. Bons resultados também foram obtidos com as alocações em V e bowl, nesta ordem, sempre aplicadas ao sistema CONWIP. A

exceção ficou por conta da alocação alternada aplicada ao sistema CONWIP com WIP igual a 5, que superou a alocação bowl e ficou em terceiro lugar. Mais uma vez, a diminuição no nível de desbalanceamento fez com que diminuísse ainda mais o predomínio das alocações balanceadas.

A tabela B39 do anexo B apresenta os resultados.

CV = 0,5 e $GD_{(alt)}$

- A alocação balanceada aplicada ao sistema CONWIP foi sempre a melhor opção em todos os níveis de WIP pesquisados. Com o aumento do nível de WIP a alocação balanceada passa a figurar como as melhores opções primeiramente com o sistema Kanban e, para níveis ainda mais altos de WIP, também com o sistema ROP. A alocação em V aplicada ao CONWIP também se mostrou bastante atraente.

A tabela B40 do anexo B apresenta os resultados.

CV = 0,5 e $GD_{(méd)}$

- A alocação balanceada aplicada ao sistema CONWIP foi sempre a melhor opção em todos os níveis de WIP pesquisados. Com o aumento do nível de WIP a alocação balanceada passa a figurar como as melhores opções primeiramente com o sistema Kanban e, para níveis ainda mais altos de WIP, também com o sistema ROP. Porém, a intensidade com que este fenômeno se manifesta é menos intenso que o ocorrido com $GD_{(alt)}$, já que a alocação em V aplicada ao CONWIP se manteve como segunda ou terceira opção em todos os níveis de WIP, ficando sempre, inclusive, a frente da alocação balanceada aplicada ao sistema ROP.

A tabela B41 do anexo B apresenta os resultados.

CV = 0,5 e $GD_{(bxo)}$

- A alocação balanceada aplicada ao sistema CONWIP foi sempre a melhor opção em todos os níveis de WIP pesquisados. No entanto, a diminuição no nível de desbalanceamento fez com que diminuísse o predomínio das alocações balanceadas. Verifica-se que a alocação em V foi a segunda melhor opção para três níveis de WIP (5, 13 e 17), a alocação bowl foi a segunda melhor para WIP igual a 7 e a alocação

linear crescente foi a segunda melhor alternativa para WIP igual a 9, sempre aplicadas ao sistema CONWIP.

A tabela B42 do anexo B apresenta os resultados.

CV = 0,2 e $GD_{(alt)}$

- A alocação balanceada aplicada ao sistema CONWIP foi sempre a melhor opção em todos os níveis de WIP pesquisados. Em segundo e terceiros lugares, respectivamente, apareceram as combinações de alocação balanceada aplicadas aos sistemas Kanban e ROP, também para todos os níveis de WIP. A combinação CONWIP/V foi a sempre a quarta melhor opção. Pode-se verificar, portanto, que a diminuição no CV melhora o desempenho das alocações balanceadas sobre as desbalanceadas.

A tabela B43 do anexo B apresenta os resultados.

CV = 0,2 e $GD_{(méd)}$

- A alocação balanceada aplicada ao sistema CONWIP foi sempre a melhor opção em todos os níveis de WIP pesquisados. No entanto, a diminuição no nível de desbalanceamento fez com que diminuísse o predomínio das alocações balanceadas. Verifica-se que a alocação em V foi a segunda melhor opção para WIP igual a 5 e que a combinação ROP/balanceada só passa a ser a terceira melhor opção quando o nível de WIP se iguala a 9 unidades.

A tabela B44 do anexo B apresenta os resultados.

CV = 0,2 e $GD_{(bxo)}$

- Pela primeira vez a combinação CONWIP/balanceada deixou de predominar em todos os níveis de WIP, ficando em terceiro quando o nível de WIP foi igual a 5. Neste nível de WIP a melhor opção foi a combinação CONWIP/V e a segunda a combinação CONWIP/bowl. Por sinal, a combinação CONWIP/V foi sempre a melhor opção dentre as combinações com alocação desbalanceada, ficando e segundo lugar em dois níveis de WIP (7 e 9), em terceiro quando WIP foi igual a 13 e em quarto para WIP igual a 17. A diminuição no nível de desbalanceamento fez com que diminuísse o predomínio das alocações balanceadas. A partir de um nível

de WIP de 7 unidades a combinação Kanban/balanceada passa a ser a segunda melhor opção e a combinação ROP/balanceada a terceira melhor opção a partir do ponto onde WIP se iguala a 9 unidades.

A tabela B45 do anexo B apresenta os resultados.

✓ Discussões em torno do nível médio de WIP

Pretende-se, novamente, determinar para cada situação de coeficiente de variabilidade e grau de desbalanceamento, qual linha de manufatura obteve os melhores desempenhos. Como o sistema ROP, segundo as discussões anteriormente efetuadas, obteve desempenhos inferiores aos demais sistemas de PCP estudados na grande maioria dos casos, este foi desconsiderado da análise. Os seguintes resultados foram verificados.

CV = 1,0 e $GD_{(alt)}$

- Quando $CV = 1,0$ a melhor combinação ficou com a Kanban/step, seguida pela CONWIP/step, até onde se pôde plotar pontos no gráfico para estas combinações. A partir deste ponto, em níveis mais altos de WIP, as seguintes combinações se destacaram: CONWIP/balanceada, CONWIP/LC, Kanban/balanceada e CONWIP/bowl, nesta ordem.

CV = 1,0 e $GD_{(méd)}$

- Duas combinações se destacaram para $CV = 1,0$ e nível de WIP baixo: CONWIP/step e a Kanban/step. Conforme o nível de WIP vai aumentando, a combinação Kanban/step passa a ter o melhor desempenho, seguidas pelas combinações CONWIP/step e Kanban/LC, até onde vão seus gráficos. Outra combinação de destaque é a CONWIP/LC. Para níveis altos de WIP os destaques passam a ser as combinações CONWIP/step e CONWIP/LC, porém duas novas combinações aparecem com bons desempenhos: CONWIP/balanceada e CONWIP/bowl.

CV = 1,0 e $GD_{(bxo)}$

- O melhor desempenho ficou com o TPC aplicado a uma alocação tipo segmentada para $CV = 1,0$. Ainda com $CV = 1,0$, a segunda melhor combinação também ficou

com o TPC numa alocação em V, principalmente quando o nível de WIP é relativamente baixo. Ao se aumentar o nível de WIP o sistema CONWIP/*step* tende a diminuir a diferença e até mesmo a igualar em desempenho com o sistema TPC/V.

CV = 0,5 e GD_(alt)

- Para CV = 0,5, e níveis baixos de WIP, quatro combinações se destacam: Kanban/LC, CONWIP/balanceada, CONWIP/LC e Kanban/balanceada, sem que nenhuma destas tivesse grande predomínio sobre as demais. Com o aumento no nível de WIP, no entanto, as combinações CONWIP/balanceada e Kanban/balanceada tendem a ser as melhores opções, com uma boa vantagem sobre as demais. Observou-se também que o aumento no WIP melhorou o desempenho relativo das combinações TPC/V e kanban/V.

CV = 0,5 e GD_(méd)

- Para CV = 0,5 e nível baixo de WIP, as combinações CONWIP/*step* e Kanban/*step* se mostraram melhores que as demais. Ao se aumentar, no entanto, o nível de WIP a configuração CONWIP/balanceada passa a ser a melhor opção, seguida de perto pela combinação Kanban/balanceada.

CV = 0,5 e GD_(bto)

- Com CV = 0,5, o desempenho relativo entre os sistemas depende do nível de WIP. Quando este nível é baixo os sistemas TPC/segmentado, Kanban/LC, Kanban/*step* e CONWIP/*step* parecem ter os melhores desempenhos. Com o aumento no nível de WIP os sistemas Kanban/*step* e Kanban/LC passam a ter o melhor desempenho, vindo a seguir o sistema CONWIP/*step*.

CV = 0,2 e GD_(alt)

- Para CV = 0,2, o destaque, disparado, fica por conta das combinações CONWIP/balanceada e Kanban/balanceada. Os sistemas CONWIP/*step*, TPC/*step*, Kanban/*step*, CONWIP/LC, TPC/LC e Kanban/LC permitiram que se plotassem apenas uma pequena faixa de valores (praticamente apenas um único ponto), num nível bastante baixo de WIP. Fica difícil, portanto, avaliar-se o desempenho destes

sistemas. Os sistemas TPC/V, CONWIP/V e Kanban/V também se destacaram aqui.

CV = 0,2 e $GD_{(méd)}$

- Para CV = 0,2, as melhores combinações continuam sendo a CONWIP/balanceada e Kanban/balanceada, nesta orde, para toda a faixa de WIP. Outras combinações também merecem destaques como a CONWIP/bowl quando o nível de WIP foi baixo e as combinações TPC/V, CONWIP/V e Kanban/V para níveis mais altos de WIP.

CV = 0,2 e $GD_{(bso)}$

- Para CV = 0,2, os sistemas CONWIP/step e kanban/step foram os que melhores resultados apresentaram quando o nível de WIP é baixo. Ao aumentar-se o nível de WIP, os sistemas Kanban/step e CONWIP/step deixam de apresentar resultados para esta faixa de WIP, e novas combinações passam a ter destaque, como os sistemas CONWIP/balanceada, kanban/balanceada, Kanban/LC e CONWIP/LC, nesta ordem. Com níveis ainda mais altos de WIP, os sistemas CONWIP/balanceada, Kanban/balanceada, TPC/V e Kanban/V foram os que melhores resultados apresentaram, também nesta ordem.

As tabelas 4.40, 4.41 e 4.42 apresentam um resumo com as principais combinações alocação/PCP, considerando-se apenas os três sistemas de PCP analisados acima.

TABELA 4.40: quadro resumo com as melhores combinações PCP/alocação de capacidades com CV=1,0

CV = 1,0 e GD(alt) - CONWIP x Kanban x TPC				
Desemp. WIP	Primeiro	Segundo	Terceiro	Quarto
Baixo	KNB/step	CWP/step	KNB/LC	CWP/LC
Médio	KNB/step e CWP/step	KNB/step e CWP/step	KNB/LC	CWP/LC
Alto	CWP/bal	CWP/LC	KNB/bal	CWP/bwl
CV = 1,0 e GD(méd) - CONWIP x Kanban x TPC				
Desemp. WIP	Primeiro	Segundo	Terceiro	Quarto
Baixo	CWP/step e KNB/step	CWP/step e KNB/step	KNB/LC	CWP/LC
Médio	KNB/step	CWP/step e KNB/LC	CWP/step e KNB/LC	CWP/LC
Alto	CWP/step	CWP/LC	CWP/bal e CWP/bwl	CWP/bal e CWP/bwl
CV = 1,0 e GD(bxo) - CONWIP x Kanban x TPC				
Desemp. WIP	Primeiro	Segundo	Terceiro	Quarto
Baixo	TPC/seg	TPC/V	CWP/step	CWP/LC
Médio	TPC/seg	CWP/step	TPC/V e CWP/LC	TPC/V e CWP/LC
Alto	TPC/seg	TPC/V	KNB/LC	KNB/step

TABELA 4.41: quadro resumo com as melhores combinações PCP/alocação de capacidades com CV=0,5

CV = 0,5 e GD(alt) - CONWIP vs Kanban vs TPC				
Desemp. WIP	Primeiro	Segundo	Terceiro	Quarto
Baixo	KNB/LC e CWP/bal	KNB/LC e CWP/bal	CWP/LC e KNB/bal	CWP/LC e KNB/bal
Médio	CWP/bal e KNB/bal	CWP/bal e KNB/bal	TPC/V e CWP/bwl	TPC/V e CWP/bwl
Alto	CWP/bal e KNB/bal	CWP/bal e KNB/bal	TPC/V	KNB/V
CV = 0,5 e GD(méd) - CONWIP vs Kanban vs TPC				
Desemp. WIP	Primeiro	Segundo	Terceiro	Quarto
Baixo	CWP/step e KNB/step	CWP/step e KNB/step	KNB/LC	CWP/LC
Médio	CWP/bal	KNB/bal	KNB/LC	CWP/LC
Alto	CWP/bal e KNB/bal	CWP/bal e KNB/bal	CWP/bwl	KNB/bwl
CV = 0,5 e GD(bxo) - CONWIP vs Kanban vs TPC				
Desemp. WIP	Primeiro	Segundo	Terceiro	Quarto
Baixo	KNB/LC, KNB/step, CWP/step e TPC/seg	KNB/LC, KNB/step, CWP/step e TPC/seg	KNB/LC, KNB/step, CWP/step e TPC/seg	KNB/LC, KNB/step, CWP/step e TPC/seg
Médio	KNB/LC, KNB/step	KNB/LC, KNB/step	CWP/step	TPC/seg e CWP/LC
Alto	KNB/step	KNB/LC	CWP/step	CWP/LC

TABELA 4.42: quadro resumo com as melhores combinações PCP/alocação de capacidades com $CV=0,2$

CV = 0,2 e GD(alt) - CONWIP vs Kanban vs TPC				
Desemp. WIP	Primeiro	Segundo	Terceiro	Quarto
Baixo	KNB/bal e CWP/bal	KNB/bal e CWP/bal	TPC/V	CWP/V
Médio	KNB/bal e CWP/bal	KNB/bal e CWP/bal	TPC/V, CWP/V e KNB/V	TPC/V, CWP/V e KNB/V
Alto	CWP/bal	KNB/bal	TPC/V, CWP/V e KNB/V	TPC/V, CWP/V e KNB/V
CV = 0,2 e GD(méd) - CONWIP vs Kanban vs TPC				
Desemp. WIP	Primeiro	Segundo	Terceiro	Quarto
Baixo	CWP/bal	KNB/bal	CWP/bal	TPC/V
Médio	CWP/bal	KNB/bal	TPC/V	KNB/V
Alto	CWP/bal	KNB/bal	TPC/V, CWP/V e KNB/V	TPC/V, CWP/V e KNB/V
CV = 0,2 e GD(bxo) - CONWIP vs Kanban vs TPC				
Desemp. WIP	Primeiro	Segundo	Terceiro	Quarto
Baixo	KNB/step e CWP/step	KNB/step e CWP/step	KNB/LC	CWP/LC e TPC/seg
Médio	CWP/bal	KNB/bal	KNB/LC	CWP/LC
Alto	CWP/bal	KNB/bal	TPC/V	KNB/V

4.4.4 Análise dos resultados baseada na hipótese 4

Hipótese 4: existe um sistema de PCP que se sobressaia em relação aos demais sob quaisquer critérios de alocação de capacidades.

✓ Discussões em torno do nível máximo de WIP

Para quaisquer critérios de alocações de capacidades estudados o sistema CONWIP nunca foi superado pelos demais sistemas de PCP para um mesmo nível de desbalanceamento e para iguais coeficientes de variabilidades.

Nos cinco níveis máximos de WIP estudados (5, 7, 9, 13 e 17) não se encontrou, em nenhum momento, uma situação onde, para determinado tipo de linha (com seu grau de variabilidade dos processos e critério de alocação de capacidades entre recursos) e determinado nível máximo de WIP, o sistema CONWIP tivesse tido um *throughput* inferior ao observado nos sistemas Kanban e *Reorder Point*.

Tal resultado parece confirmar as hipóteses levantadas em TAYUR (1993) e MUCKSTADT & TAYUR (1995a e 1995b), que afirmam que, para um determinado número de cartões (os quais refletem um nível máximo de WIP), o CONWIP se apresenta como o sistema,

dentre os sistemas estudados com WIP limitado, que obteve o maior *throughput* para um mesmo nível de WIP máximo. A tabela 4.43 a seguir ilustra estes resultados:

TABELA 4.43: as melhores alocações PCP/alocação de capacidades sob o enfoque do nível máximo de WIP

CV	WIP = 5		WIP = 7		WIP = 9		WIP = 13		WIP = 17	
	Sistema	OP	Sistema	OP	Sistema	OP	Sistema	OP	Sistema	OP
0,2	CWP/V	43,445	CWP/bal	47,357	CWP/bal	48,377	CWP/bal	49,209	CWP/bal	49,461
0,5	CWP/bal	35,982	CWP/bal	40,842	CWP/bal	43,203	CWP/bal	45,538	CWP/bal	46,736
1,0	CWP/bal	28,057	CWP/bal	32,241	CWP/bal	35,016	CWP/bal	38,406	CWP/bal	40,512

O mesmo raciocínio também é válido para o sistema Kanban em relação ao sistema ROP, ou seja, o sistema ROP nunca teve desempenho superior ao sistema Kanban para um mesmo nível de desbalanceamento e para iguais coeficientes de variabilidades.

Uma observação, no entanto, deve ser feita neste ponto: conforme se diminui o CV ou se aumenta o nível de WIP, todos os três sistemas de PCP tendem ao mesmo desempenho. Para WIP igual a 17, CV = 0,2 e $GD_{(bco)}$, por exemplo, verificou-se diversas situações onde os três sistemas tiveram desempenhos praticamente idênticos.

✓ Discussões em torno do nível médio de WIP

As tabelas 4.6 a 4.27 parecem indicar que para diversas configurações de alocação de capacidades existem sistemas de PCP que melhor se adaptam. De fato, constatou-se que os quatro sistemas de PCP, dependendo do critério de alocação e das condições da linha (nível de WIP médio, CV e GD), podem ser as melhores opções. A tabela 5.1 na sequência do trabalho permite constatar esta afirmação.

4.4.5 Análise dos resultados baseada na hipótese 5

Hipótese 5: existe um critério de alocação de capacidades que se sobressaia em relação aos demais sob quaisquer sistemas de PCP.

✓ Discussões em torno do nível máximo de WIP

A tabela 4.5 parece indicar que para cada sistema de PCP estudado, pode-se encontrar alguns critérios de alocação de capacidades mais favoráveis que outros. Da tabela 4.5 pode-se verificar que ainda que a locação balanceada tenha se mostrado a preferível para a maioria dos

sistemas de PCP e, principalmente, para o CONWIP, outros critérios de alocação, como o *bowl* e em menores proporções as alocações em V, segmentada e linear decrescentes, também obtiveram bons desempenhos.

✓ Discussões em torno do nível médio de WIP

As tabelas 4.28 a 4.39 parecem mais uma vez indicar que para cada sistema de PCP estudado, pode-se encontrar critérios de alocação de capacidades mais favoráveis que outros. Dependendo das combinações entre as variáveis Coeficiente de Variabilidade, Grau de Desbalanceamento e nível de WIP médio, cada sistema de PCP obteve os melhores resultados em diferentes critérios de alocação de tempos de processamento. No sistema CONWIP, as alocações balanceada e *step* foram as que melhores resultaram apresentaram. No Kanban, sobressaíram, além das alocações balanceada e *step*, também a linear crescente. No *Reorder Point*, por sua vez, além dos três critérios citados, a locação *bowl* também se mostrou a mais atraente em determinada situação. Por fim, no TPC, todos os quatro critérios de alocação testados obtiveram os melhores resultados dependendo da combinação das variáveis analisadas.

A seguir, no capítulo 5, são apresentadas as conclusões referentes às interpretações e observações feitas até aqui. Basicamente, três assuntos serão abordados. O primeiro procurará responder, de uma maneira agora mais sucinta, às hipóteses desta tese. O segundo assunto tratará de questões mais práticas, como aquelas relacionadas a seleção de projetos de linhas e sistemas de PCP mais apropriados para situações específicas. Por fim, são propostos trabalhos futuros, como forma de sugerir continuidades a esta pesquisa.

5. CONCLUSÕES GERAIS, APLICAÇÕES PRÁTICAS, E TRABALHOS FUTUROS

Durante todo o desenvolvimento deste trabalho procurou-se identificar possíveis conexões ou relacionamentos entre duas importantes questões gerenciais. A primeira delas trata de como melhor aproveitar, sob o ponto de vista logístico, os recursos existentes numa planta fabril. A este tipo de questão logística é dado aqui o nome de técnica de Planejamento e Controle da Produção (PCP). O segundo tipo de questão gerencial está relacionado ao planejamento de capacidades produtivas de recursos de manufatura ou projeto de fábrica. O objetivo desta área de conhecimento é também permitir que, com uma alocação racional de capacidades ou cargas de trabalho entre recursos, se possa também maximizar o *throughput* de uma fábrica.

Sendo, portanto, ambas as áreas gerenciais voltadas para uma mesma tentativa de “otimização” do uso dos recursos de manufatura, porque então estas são abordadas comumente de forma independente uma da outra? Existe relação entre ambas? Se existe e se bem compreendida esta relação, então se pode supor que ao trabalhar-se estas duas questões gerenciais de maneira conjunta, pode-se alcançar um incremento ainda maior na relação *throughput*/investimento.

Posto isto, discutir-se-á a seguir, de acordo com os resultados obtidos no processo de pesquisa, se se pode dizer algo que auxilie nas tomadas de decisões gerenciais relativas aos temas acima citados.

Primeiramente, no tópico a seguir procurar-se-á responder as hipóteses que esta tese se propôs a analisar e consolidar as conclusões alcançadas neste trabalho. Em seguida, discutir-se-á algumas importantes questões gerenciais que as observações coletadas até aqui poderão auxiliar nas respostas. Três assuntos serão abordados. O primeiro se relaciona a situação onde uma fábrica, já em operação e, portanto, com seus recursos já instalados, deve decidir sobre sistemas de gestão da produção. Outro assunto a ser considerado refere-se à situação onde o gerente de uma fábrica, ainda em seu estado inicial de projeto de planta, deve decidir que tipo de disposição de capacidades de recursos instalar e que tipo de sistema de PCP irá controlar o fluxo de materiais.

Por fim, são propostas algumas iniciativas para trabalhos futuros, como forma de permitir que a pesquisa até aqui realizada possa ser dada continuidade.

5.1 Conclusões gerais

Das observações comentadas no capítulo anterior, fica evidente a existência de uma estreita relação entre políticas de PCP e técnicas de alocação de capacidades. Como foi oportunamente comentado, o desempenho dos sistemas de PCP depende do tipo de configuração de distribuição de capacidades entre recursos, assim como também ficou evidente que as técnicas de alocação de capacidades são melhor ou pior aproveitadas dependendo do tipo de sistema de PCP adotado.

E não é só isso. Também ficou claro que determinados níveis de estoque em processo (WIP), variabilidades nos tempos de processamento (CV) ou graus de desbalanceamento (GD) entre recursos impõem desempenhos distintos tanto para as diferentes políticas de PCP quanto também para os diversos critérios de alocação de capacidade.

Algumas conclusões podem ser então descritas, as quais serão apresentadas de acordo com as hipóteses apresentadas no capítulo 1 e reeditadas a seguir: Antes disso, no entanto, convém lembrar que toda a discussão apresentada até aqui se procedeu em torno de modelos relativamente simples, cuja extrapolação dos resultados para situações mais complexas exige novas pesquisas. Deve-se enfatizar ainda que todos os resultados obtidos podem ser considerados válidos quando as premissas adotadas nos modelos prevalecerem em situações reais, que são:

- Número de recursos limitado a cinco;
- Coeficientes de variabilidade iguais a 0,2 e 0,5 adotados segundo distribuições triangulares e CV igual a 1,0 segundo uma distribuição exponencial;
- Inexistência de restrições quanto a fornecimento de matéria-prima;
- Inexistência de restrições quanto ao armazenamento ou venda de produtos acabados;
- Um único tipo de produto manufaturado;
- Não há operações de montagem.

Além disso, diversas hipóteses simplificadoras foram adotadas quanto à elaboração das políticas de PCP e dos critérios de alocação de capacidades:

- Método adotado para alocação de cartões Kanban baseado em resultados alcançados em linhas balanceadas;

- Tempos de processamento, para todas as alocações desbalanceadas, determinados arbitrariamente em função dos estudos de um único tipo de critério de desbalanceamento, o fenômeno *bowl*;
- Método TPC aplicado supondo completo conhecimento das capacidades dos recursos;
- Distribuição de cartões no método Kanban ou de capacidades máximas para armazenamento de material no *Reorder Point* determinados em função de estudos realizados em linhas balanceadas, podendo estar sub-otimizadas para situações de linhas desbalanceadas;
- Informações para autorização ou bloqueio de produção fluindo instantaneamente dentro da linha.

Ressaltadas as condições em que a pesquisa se desenvolveu, seguem-se as respostas encontradas para as hipóteses formuladas nesta tese.

Hipótese 1: os desempenhos dos diversos tipos de configurações de distribuição de capacidades entre recursos de uma linha de manufatura variam significativamente segundo o sistema de gestão de produção empregado.

Sim, o desempenho de um método de alocação de capacidades depende fortemente do sistema de gestão da produção empregado e este desempenho depende do nível de WIP planejado, da variabilidade dos tempos de processamento dos recursos e, no caso de linhas desbalanceadas, do grau de desbalanceamento dos recursos.

Foi observado ainda que esta dependência existe tanto para desempenhos medidos em torno de níveis máximos de WIP (ver tabela 4.5) quanto para níveis médios (ver tabela 5.1 a seguir, a qual sintetiza as tabelas 4.28 a 4.39).

Em particular, vale aqui dizer que o fenômeno *bowl* deixa de apresentar resultados satisfatórios quando o sistema ROP é substituído por outro sistema de gestão da produção, ao contrário do que parece indicar as pesquisas na área. Mais a frente neste capítulo esta questão voltará a ser melhor discutida.

TABELA 5.1: os melhores critérios de alocação de capacidades para cada PCP segundo o enfoque do nível médio de WIP

WIP	PCP	GD baixo e balanceada			GD médio e balanceada			GD alto e balanceada		
		CV=0,2	CV=0,5	CV=1,0	CV=0,2	CV=0,5	CV=1,0	CV=0,2	CV=0,5	CV=1,0
baixo	ROP	Step/LC	LC	LC	Step	Step/LC	LC	Balançada	Step	Step/LC
	Kanban	Step	Step/LC	Step/LC	Step	Step	Step/LC	Balançada	Step	Step
	CONWIP	Step	Step	Step	Balançada	Step	Step	Balançada	Step	Step
	TPC	Step	Segmentada	Segmentada	Step/LC	Step	Segmentada	Step/LC	Step	Segmentada
médio	ROP	LC	Step/LC	Step/LC	Balançada	LC	Step	Balançada	Balançada	Step/LC
	Kanban	Balançada	Step/LC	Step/LC	Balançada	LC	Step	Balançada	Balançada	Step
	CONWIP	Balançada	Step	Step	Balançada	Balançada	Step	Balançada	Balançada	Step
	TPC	LC	Segmentada	Segmentada	V	LC	Segmentada	V	LC	Step
alto	ROP	Balançada	Step/LC	Step/LC	Balançada	Balançada	Bowl	Balançada	Balançada	Balançada
	Kanban	Balançada	Step/LC	Step/LC	Balançada	Balançada	Balançada	Balançada	Balançada	Balançada
	CONWIP	Balançada	Step	Step	Balançada	Balançada	Step	Balançada	Balançada	Balançada
	TPC	V	Step	Segmentada	V	V	Step	V	V	LC

Hipótese 2: os desempenhos dos diversos tipos de sistemas de gestão da produção variam significativamente segundo o tipo de configuração de distribuição de capacidades entre recursos empregado.

Sim, o desempenho de um sistema de PCP depende fortemente do método de alocação de capacidades adotado e este desempenho depende do nível de WIP planejado, da variabilidade dos tempos de processamento dos recursos e, no caso de linhas desbalanceadas, do grau de desbalanceamento dos recursos.

Mais uma vez, notou-se que a dependência dos sistemas de PCP em relação aos critérios de alocação de capacidades existe independentemente de se medir o desempenho em torno do nível máximo de WIP (ver tabelas B28 a B36 do anexo B) ou do nível médio de WIP (ver tabela 5.2).

TABELA 5.2: quadro resumo de tomada de decisão para sistema de PCP dado certas condições da linha de manufatura e desempenho medido segundo o WIP médio

GD	Critério de alocação	WIP baixo			WIP médio			WIP alto		
		CV=0,2	CV=0,5	CV=1,0	CV=0,2	CV=0,5	CV=1,0	CV=0,2	CV=0,5	CV=1,0
-	balanceamento	KNB/CWP	KNB/CWP	CWP	CWP	KNB/CWP	CWP	CWP	KNB/CWP	CWP
b a i x o	bowl	CWP	CWP	CWP	CWP	CWP	CWP	CWP	CWP	CWP
	Linear Crescente	KNB/CWP/ROP	KNB/CWP	CWP	KNB	KNB/CWP	KNB/CWP	RCP	KNB	KNB/CWP
	Linear Decrescente	CWP	CWP	CWP	CWP	CWP	CWP	CWP	CWP	CWP
	Alternado	KNB/CWP	KNB/CWP	CWP	KNB	KNB/CWP	CWP	KNB/CWP	KNB/CWP	CWP
	Step	CWP	KNB/CWP	CWP	KNB	KNB/CWP	KNB/CWP	KNB	KNB	KNB/CWP
	Segmentado	TPC	TPC	TPC	TPC	TPC	TPC	KNB/TPC	TPC	TPC
	V	TPC	TPC	TPC	TPC	TPC	TPC	TPC	TPC	TPC
	bowl	CWP	CWP	CWP	KNB/CWP	CWP	CWP	KNB/CWP/ROP	CWP	CWP
	Linear Crescente	CWP	KNB/CWP	KNB/CWP	KNB/RCP	KNB/CWP	KNB	KNB/RCP	TPC	KNB
	Linear Decrescente	CWP	CWP	CWP	KNB/CWP	CWP	CWP	KNB/CWP/ROP	CWP	CWP
m é d i o	Alternado	KNB/CWP	KNB/CWP	CWP	KNB	KNB/CWP	CWP	KNB	KNB	CWP
	Step	CWP	CWP	CWP	CWP	KNB	KNB/CWP	CWP	RCP	KNB
	Segmentado	TPC	TPC	TPC	KNB/CWP/TPC	TPC	TPC	KNB/CWP/TPC/RCP	TPC	TPC
	V	TPC	TPC	TPC	TPC	TPC	TPC	TPC	TPC	TPC
	bowl	CWP	CWP	CWP	KNB/CWP	CWP	CWP	KNB/CWP/ROP	CWP	CWP
	Linear Crescente	CWP	RCP	KNB	KNB/RCP	KNB/RCP	KNB	KNB/RCP	RCP	KNB
	Linear Decrescente	CWP	CWP	CWP	KNB/CWP	CWP	CWP	KNB/CWP/ROP	CWP	CWP
	Alternado	KNB/CWP	KNB/CWP	CWP	KNB	KNB	CWP	KNB	KNB	CWP
	Step	KNB/CWP/ROP	CWP	KNB/CWP	KNB/CWP/ROP	KNB	KNB/CWP	KNB/CWP/ROP	KNB/RCP	KNB
	Segmentado	TPC	TPC	TPC	KNB/CWP/TPC/RCP	TPC	TPC	KNB/CWP/TPC/RCP	TPC	TPC
	V	TPC	TPC	TPC	TPC	TPC	TPC	TPC	TPC	TPC
a l t o	bowl	CWP	CWP	CWP	KNB/CWP	CWP	CWP	KNB/CWP/ROP	CWP	CWP
	Linear Crescente	CWP	RCP	KNB	KNB/RCP	KNB/RCP	KNB	KNB/RCP	RCP	KNB
	Linear Decrescente	CWP	CWP	CWP	KNB/CWP	CWP	CWP	KNB/CWP/ROP	CWP	CWP
	Alternado	KNB/CWP	KNB/CWP	CWP	KNB	KNB	CWP	KNB	KNB	CWP
	Step	KNB/CWP/ROP	CWP	KNB/CWP	KNB/CWP/ROP	KNB	KNB/CWP	KNB/CWP/ROP	KNB/RCP	KNB
	Segmentado	TPC	TPC	TPC	KNB/CWP/TPC/RCP	TPC	TPC	KNB/CWP/TPC/RCP	TPC	TPC
	V	TPC	TPC	TPC	TPC	TPC	TPC	TPC	TPC	TPC
	bowl	CWP	CWP	CWP	KNB/CWP	CWP	CWP	KNB/CWP/ROP	CWP	CWP
	Linear Crescente	CWP	RCP	KNB	KNB/RCP	KNB/RCP	KNB	KNB/RCP	RCP	KNB
	Linear Decrescente	CWP	CWP	CWP	KNB/CWP	CWP	CWP	KNB/CWP/ROP	CWP	CWP

Hipótese 3: existe uma combinação ótima “configuração de distribuição de capacidades” x “sistemas de gestão da produção”, dentro do escopo aqui estudado, que maximize a taxa de produção em quaisquer circunstâncias.

A resposta para esta pergunta depende da análise estar focada no nível de WIP máximo ou médio. No primeiro caso, onde se exclui o sistema TPC, ficou evidente que a melhor combinação ficou com o sistema CONWIP empregado numa linha balanceada. A única exceção se deu quando o CV foi de 0,2 e o nível de WIP máximo foi 5. Neste caso a melhor combinação ficou com o sistema CONWIP aplicado a uma alocação em V (ver tabela 4.43).

Quando o enfoque está no nível médio de WIP, a cada situação, variando-se o CV, o grau de desbalanceamento e o nível médio de WIP, encontra-se diferentes combinações PCP x alocação de capacidade que possibilitam os melhores resultados (ver tabela 5.3).

Hipótese 4: existe um sistema de PCP que se sobressaia em relação aos demais sob quaisquer critérios de alocação de capacidades.

Mais uma vez, a resposta deve estar estratificada segundo a maneira de se medir desempenho. Se o foco estiver sobre o nível de WIP máximo (exclui-se, portanto, o TPC), sob quaisquer critérios de alocação de capacidade e ainda sob as mesmas condições (GD, CV e

WIP), o sistema CONWIP é sempre superior ao Kanban e ao ROP. O Kanban, por sua vez, também é jamais superado pelo ROP (ver tabelas B46 a B48 do anexo B).

Entretanto, focando-se no nível médio de WIP e observando-se os resultados, pode-se verificar que, mudando-se o tipo de critério de alocação de capacidades, altera-se o predomínio de um sistema de PCP em relação aos demais (ver tabela 5.2).

Portanto, não há um sistema de PCP que responda bem a todas as situações.

Hipótese 5: existe um critério de alocação de capacidades que se sobressaia em relação aos demais sob quaisquer sistemas de PCP.

Novamente a resposta necessita ser calcada no tipo de enfoque sobre o nível de WIP. Sob o enfoque do nível máximo de WIP, a tabela 4.5 demonstra que as melhores alocações de capacidades podem mudar ao se alterar o tipo de sistema de PCP.

Sob o enfoque do nível médio de WIP, a tabela 5.1 demonstra, mais uma vez, não haver um predomínio de nenhum critério de alocação de capacidades sob os demais em quaisquer circunstâncias de PCP.

Portanto, não há um critério de alocação de capacidade que responde bem a todas as situações.

Se há uma forte correlação entre os fatores PCP, alocação de capacidades, CV, WIP e GD, qual critério de seleção deve ser usado para se encontrar uma adequada estratégia de manufatura em função das variáveis citadas?

A seguir, serão expostas algumas novas discussões referentes aos resultados obtidos nesta tese. Para tal, o texto que se segue será dividido em dois tópicos. O primeiro tratará dos critérios de alocação de capacidades e o segundo das políticas de PCP.

5.1.1 Os critérios de alocação de capacidades

Como já amplamente comentado ao longo deste trabalho, existe uma aceitação quase que universal nos meios acadêmicos que a melhor e mais racional forma de se alocar capacidades produtivas aos recursos de manufatura é a balanceada, como discutido em HILLIER & BOLING (1966), FRY & RUSSELL (1993), ATWATER & CHAKRAVORTY (1994) e GOLDRATT & COX (1995).

Outro grupo de pesquisadores, em número muito menor que o primeiro, afirma que existe outra forma ainda mais racional de se aproveitar as capacidades de produção de uma linha

de manufatura, denominada *bowl* (HILLIER & BOLING (1966), EL-RAYAH (1979a), HILLIER & BOLING (1979), SO (1989) e HILLIER & SO (1993), PIKE & MARTIN (1994)). Ainda que existam estudos relacionados a outras metodologias de alocação de cargas de trabalho, estas duas são comumente vistas como as melhores.

Esta pesquisa verificou, no entanto, que talvez nem uma nem outra metodologia de distribuição de capacidades ao longo de uma linha de produção é a melhor para todas as situações. Ficou evidenciado que a resposta para este tema depende de muitos fatores, alguns deles geralmente considerados em pesquisas na área, como nível de estoque em processo e coeficiente de variabilidade. Outros, no entanto, são geralmente negligenciados como os tipos de PCP no qual se estuda determinado tipo de configuração de capacidades. Outro ponto nem sempre devidamente considerado é a diferenciação entre níveis médios e máximos de WIP. A maioria das pesquisas na área analisou os resultados apenas segundo o nível máximo de WIP.

Já foi também discutido o fato que a maioria dos estudos sobre a melhor forma de alocação de capacidades foi feito fixando-se um único tipo de PCP, o qual foi aqui denominado de *Reorder Point* (ROP). Fundamentalmente, este sistema limita a capacidade de estocagem de material entre cada recurso, ficando um recurso autorizado a produzir quando o limite de estocagem não foi atingido e haja material para processar.

De fato, quando analisadas segundo o sistema ROP, as configurações nas formas *bowl* e balanceada obtiveram bons resultados, o que confirma parte das pesquisas na área. Também é fato que, como já concluído em outros estudos, o fenômeno *bowl* fica mais evidente e seus resultados superam a alocação balanceada quando o nível de WIP é mais baixo e o CV é relativamente alto. Para pequenos níveis de CV e altos níveis de WIP a alocação balanceada se torna a preferível. Estes fatos ficaram comprovados neste trabalho quando a análise foi feita segundo o nível *máximo* de WIP no sistema (ver tabela 4.5).

Porém, a análise dos resultados possibilitou ainda que se verificassem outros tipos de alocação de capacidades que também apresentaram bons desempenhos mesmo que a eles se estivesse aplicando o sistema ROP. Observou-se, por exemplo, quando o foco está no nível *máximo* de WIP, e que este foi de cinco unidades, as alocações *step* (CV iguais a 0,2, 0,5 e 1,0) e alternada (CV igual a 0,2) superaram a balanceada. Também se observou que quando o nível de WIP foi de sete unidades, as alocações segmentadas e em V (CV iguais a 0,2, 0,5 e 1,0) e a *step* (CV igual a 1,0) superaram não apenas a alocação balanceada como também a alocação *bowl*. Ainda que estes resultados sejam advindos do fato que a distribuição de capacidades de estocagem quando o nível de WIP no sistema é sete unidades privilegia os recursos centrais e

que nas alocações segmentada, em V e *step* os recursos gargalos estão de fato mais no centro da linha, estes resultados continuam sendo significativos (ver novamente tabela 4.5).

Ao se observar os resultados provenientes da análise em torno do nível *médio* de WIP, percebe-se que outras alocações se destacam como a linear crescente, a *step* e quando o nível de variabilidade é 0,2, também a alocação em V.

Não há, portanto, mesmo considerando a análise das potencialidades dos diversos critérios de alocações de capacidade à luz do sistema ROP, nada que permita afirmar sobre a predominância das alocações balanceadas e *bowI* sobre todas as demais.

Quando o estudo extrapola para outros sistemas de PCP, os resultados novamente voltam a confirmar a não predominância absoluta das alocações balanceadas e *bowI* sobre as demais. No sistema Kanban, quando a análise se dá em torno do nível *máximo* de WIP, as alocações *step*, alternada, V e LD superam, em muitas situações, a alocação balanceada ou a *bowI*. Observando-se os resultados segundo o nível *médio* de WIP, novamente nota-se que certas situações são mais favoráveis a critérios outros que não a alocação balanceada ou a *bowI*, como a *step* e linear crescente, mais uma vez.

Analisando-se agora os critérios de alocação sob o CONWIP, e observando-se os resultados segundo o foco do nível *máximo* de WIP, percebe-se, uma vez mais, que outras alocações podem se destacar, como a V, que supera a balanceada quando o nível de WIP é 5 e o CV é 0,2. No entanto, é no sistema CONWIP que de fato a alocação balanceada se destaca, sendo a melhor opção em todas as demais situações. Porém, o mesmo não se pode afirmar quanto ao método *bowI*. Ainda que quando o CV é 0,2 ela perde apenas para alocação em V (dentre as desbalanceadas), com o aumento do CV ela se torna inferior a diversas outras alocações.

Se a alocação balanceada parece ser a melhor opção no sistema CONWIP, este argumento se desfaz quando a análise se dá segundo o nível *médio* de WIP. Neste caso, as alocações *step* e linear crescente tendem a superar a balanceada quando a variabilidade nos tempos de processamento é relativamente alta ou o nível de estoque médio em processo é baixo.

Ainda que não se pôde aplicar o método TPC às linhas balanceadas e em *bowI* (por possuírem mais de um gargalo) e, portanto, validar as conclusões acima em mais um tipo de PCP, considera-se que o que foi até aqui discutido permite que se reafirme, uma vez mais, que nada indica existir um melhor critério de alocação em todas as situações. Tão pouco os melhores critérios em situações particulares se resumem sempre à alocação balanceada ou *bowI*.

5.1.2 As políticas de PCP

Ao contrário do que ocorre, segundo a literatura, com os métodos de alocação de capacidades, não existe dentre os sistemas de PCP aquele que se credencia como o melhor em todas as situações, segundo a literatura no assunto. Ainda que, devido à simplicidade dos modelos adotados para pesquisa, fica difícil avaliar-se as reais potencialidades de cada sistema, os resultados aqui alcançados permite que se faça, no mínimo, algumas correções em certos dogmas geralmente aceitos.

Diversos trabalhos sugerem, por exemplo, que os sistemas CONWIP são superiores aos sistemas Kanban (SPEARMAN *et al.* (1990), HOPP & SPEARMAN (1996), GSTETTNER & KUHN (1996)). Isto se deveria ao fato que o sistema CONWIP permite uma maior flexibilidade na maneira como os estoques fluem entre recursos, possibilitando que gargalos, temporários ou não, sejam convenientemente protegidos. De fato, quando a análise se dá em torno do nível *máximo* de WIP, o sistema CONWIP é sempre superior ao Kanban. Por outro lado, quando a análise é focada em cima do nível *médio* de WIP, o sistema kanban passa a ter, em algumas situações, desempenhos superiores ao CONWIP.

TAYUR (1993) e MUCKSTADT & TAYUR (1995a e 1995b) sugeriram em suas pesquisas que o sistema Kanban supera o CONWIP em termos de *throughput* por nível médio de WIP. Porém, as pesquisas aqui desenvolvidas indicaram que esta superioridade é contingencial, podendo o CONWIP superar o Kanban dependendo do tipo de alocação de capacidade, do nível de WIP, do grau de desbalanceamento e do nível variabilidade dos processos produtivos. Registra-se neste ponto que, embora a distribuição de cartões kanban foi modelada segundo a teoria formulada para linhas balanceadas, observou-se que em algumas situações o sistema CONWIP superou o sistema Kanban, mesmo em linhas balanceadas.

SPEARMAN *et al.* (1990) observaram que, ao permitir que WIP se concentre em frente ao recurso gargalo, o CONWIP pode funcionar com níveis mais baixos de WIP que o Kanban. Os autores não fazem distinção se a referência é em torno do nível médio ou máximo de WIP. Se o interesse estiver no nível *máximo* de WIP, o CONWIP supera o Kanban em quaisquer níveis de WIP, não necessariamente o baixo. Se o interesse é pelo nível *médio* de WIP, nada na pesquisa parece indicar um padrão de comportamento que se pudesse permitir afirmar que o CONWIP é melhor que o Kanban quando o nível de WIP é baixo. O desempenho do sistema CONWIP em relação ao Kanban parece depender de outros fatores além do WIP, como níveis de variabilidades dos processos produtivos e da maneira como as capacidades produtivas estão alocadas entre os recursos.

Devido à maneira como os recursos gargalos são explorados, era de se esperar que o sistema Tambor-Pulmão-Corda (TPC) fosse, de fato, superior aos demais sistemas de PCP. Os resultados, no entanto, apenas parcialmente refletem esta asserção. Lembrando que o sistema TPC só pode ser analisado segundo níveis *médios* de WIP, ficou evidenciado que, dado uma determinada condição de linha de manufatura, ou seja, empregando-se determinado tipo de alocação de capacidade (desde que contenha um único gargalo), com determinados graus de desbalanceamento, níveis de WIP e CV, o TPC foi jamais superado por outros sistemas de PCP.

Isto não significou, contudo, que o TPC tenha sido a melhor opção para todas as situações. Ficou constatado que seu desempenho superou todas as demais combinações PCP/alocação apenas quando o CV foi alto (1,0) e o grau de desbalanceamento baixo. Este resultado permite que se faça algumas outras considerações.

Primeiramente, talvez ao contrário do que se possa supor, o sistema TPC foi relativamente superior aos demais sistemas de PCP quando o grau de desbalanceamento foi baixo, e não alto. Uma vez que sistema TPC foi concebido com objetivo de permitir que os recursos gargalos sejam explorados ao máximo, poder-se-ia esperar que quanto mais desbalanceada a linha e, portanto, com um gargalo cada vez mais evidenciado, melhor explorado seria este recurso gargalo em relação aos demais sistemas de PCP. Não foi, entretanto, isto o que se verificou. Os melhores desempenhos relativos do TPC ocorreram quando o grau de desbalanceamento era o menor ($GD_{(bco)}$).

Este fato leva ainda a outra reflexão, relacionada agora aos conceitos de capacidade protetiva (ou protetora) e de excesso de capacidade, discutidos no tópico sobre TPC, no capítulo 2. Se desbalancear é um imperativo, como é defendido pela Teoria das Restrições (GOLDRATT (1981), GOLDRATT & FOX (1989), GOLDRATT (1991), GOLDRATT & COX (1995), CORBETT NETO (1996)), não se pode permitir que este desbalanceamento seja demasiado. Parece existir um ponto ótimo de desbalanceamento, talvez de difícil mensuração, mas que deve ser perseguido, já que linhas altamente desbalanceadas perdem muito em termos de desempenho, ficando bastante distantes de linhas perfeitamente balanceadas. Se linhas próximas ao balanceamento têm a agravante de possuir gargalos itinerantes devido a mudanças no *mix* de produção, linhas muito desbalanceadas acabam levando, por outro lado, a elevados desperdícios de capacidade dos recursos não gargalos na forma de ociosidades forçadas. Dizer, portanto, que “desbalancear é preciso” é apenas uma meia verdade, já que nada sugere qual nível de desbalanceamento deve ser alcançado.

Outro ponto interessante diz respeito ao desempenho alcançado pelo TPC em termos de nível de WIP. Como a teoria sobre TPC afirma ser importante localizar as proteções na forma de WIP apenas nos pontos onde necessário (GOLDRATT & FOX (1989), GOLDRATT (1991), SCHRAGENHEIM & RONEN (1991), GARDINER et al. (1993), CALIA (1995)), isto é, protegendo operações críticas do processo de manufatura, poder-se-ia esperar que quanto mais baixo o nível de WIP na linha, mais racionalmente o TPC estaria fazendo uso deste WIP. Isto não prevaleceu, no entanto. Em diversas situações, o desempenho relativo do sistema TPC foi melhor em níveis mais altos de WIP.

Há que se considerar, entretanto, que o sistema TPC foi concebido, ou pelo menos é bastante apto, para operar em linhas mais complexas, até mesmo em fábricas tipo *job-shop*. Pode-se esperar, então, que devido à alta simplicidade dos modelos aqui adotados, o potencial total do sistema TPC não tenha sido aproveitado. Por outro lado, um pré-requisito para o bom funcionamento dos sistemas CONWIP e principalmente do sistema Kanban, é que a fábrica tenha fluxo produtivo suave, com pequenas flutuações, tanto internas (baixo CV e *mix* reduzido) quanto externas (*mix* pouco flutuante). Estas características podem levar a uma certa parcialidade dos resultados em favor dos sistemas CONWIP e Kanban.

A seguir, serão apresentadas algumas novas discussões referentes aos resultados obtidos nesta tese sob o ponto de vista de aplicações práticas. Para tal, o texto que se segue será dividido em dois tópicos. O primeiro tratará de como melhor selecionar um sistema de PCP dada uma configuração de capacidades já existente. O segundo abordará como escolher, simultaneamente, um sistema de PCP e um critério de alocação de capacidades.

5.2 Aplicações práticas dos resultados do trabalho

Este tópico se propõe a discutir três tipos de relevantes de questões gerenciais à luz dos resultados obtidos ao longo desta pesquisa, os quais podem ser resumidos basicamente a três tipos de situações:

- a) Dado uma planta já instalada e em operação, qual é o melhor sistema de PCP que a ela deve ser empregado?
- b) Dado uma planta ainda em fase de projeto, como decidir, simultaneamente, que tipo de alocação de capacidades e que tipo de sistema de PCP fazer uso?

Antes de iniciar as discussões propostas, deve-se deixar claro que questões como as anteriores envolvem inúmeros outros aspectos além dos que aqui serão abordados. A tabela 2.1

ajuda a compreender um pouco das aplicabilidades e limitações que cada sistema de PCP tem em relação aos diversos aspectos referentes à realidade dos ambientes de manufatura, como tipo de estratégia de manufatura (produção para estoque, por encomenda, etc.), variabilidade dos produtos e da demanda, tipo de sistema produtivo (*flow shop*, *job shop*, etc.), dentre outros aspectos.

Também, não se pode esquecer que a definição de uma adequada estratégia para alocação de capacidades produtivas aos recursos fabris pode esbarrar em diversas questões técnicas, como o fato de que as capacidades dos recursos não são contínuas, mas sim, discretas.

Uma vez que, como já apresentado anteriormente, ficou claro que sob o enfoque do nível máximo de WIP na fábrica (logo sem considerar o sistema TPC), o sistema CONWIP aplicado em uma linha balanceada foi o que apresentou os melhores resultados praticamente em todas as situações, as próximas discussões tratarão exclusivamente de decisões tomadas em função do nível médio de WIP. A única exceção se deu na situação onde o nível máximo de WIP foi de 5 unidades, o $CV=0,2$ e $GD_{(bco)}$. Nesta situação o melhor desempenho foi alcançado ainda para o sistema CONWIP, porém, aplicado a uma linha em V.

O que se buscará nas discussões que se seguem é mostrar que algumas novas variáveis podem e devem fazer parte do repertório de conhecimentos gerenciais, auxiliando nas tomadas de decisões.

5.2.1 Decidindo sobre um sistema de PCP em função de algumas características do ambiente de manufatura

O objetivo deste tópico é apresentar estas variáveis, identificando como elas devem ser consideradas nos momentos de escolha de um sistema de PCP, dado um ambiente de manufatura pré-existente.

A tabela 5.2 apresentada anteriormente resume as possíveis situações variando-se a forma como as capacidades estão distribuídas, o grau de desbalanceamento (GD) destas, os níveis de variabilidades dos processos produtivos (CV) e o nível médio de WIP na fábrica. Para cada situação, propõe-se, segundo os resultados apresentados no capítulo 4, o melhor sistema de PCP. Em diversas ocasiões, entretanto, mais que um sistema de PCP é sugerido, já que a diferença observada em termos de desempenho foi muito pequena.

Deve-se sempre ter em mente que os resultados anteriores foram verificados em contingências específicas aos modelos de simulação como cinco recursos em linha, produzindo

um único tipo de produto e demanda infinita. Nada se pode afirmar quanto aos resultados que seriam obtidos em situações distintas às acima.

5.2.2 Decidindo sobre a melhor composição “alocação de capacidades e sistema de PCP”

Os resultados aqui alcançados também podem ser úteis às decisões quanto a projeto de linhas de manufatura. Aqui, as decisões sobre projetos de linhas não se limitarão apenas à identificação da maneira mais racional de se alocar capacidades produtivas a cada etapa do processo de manufatura, mas sim, prover alguns subsídios que possam auxiliar o tomador de decisão na escolha simultânea do tipo de alocação de capacidades dos recursos e do tipo de PCP que melhor se adapta a este tipo de critério de alocação de capacidades. Isto é particularmente útil para situações de fábricas ainda em fase de projeto.

Das observações apresentadas no capítulo 4, elaborou-se a tabela 5.3 a seguir, a qual consolida e sumariza os principais resultados relacionados à escolha das melhores combinações “critérios de alocação de capacidades versus PCP”. A tabela 5.3 considerará apenas os sistemas TPC, Kanban e CONWIP. O sistema ROP não foi considerado na análise.

TABELA 5.3: quadro resumo de tomada de decisão em projeto de linha com desempenhos medidos segundo o nível médio de WIP

WIP	Coeficiente de variabilidade	Grau de desbalanceamento		
		Baixo	Médio	Alto
baixo	CV=0,2	KNB/step e CWP/step	CWP/bal	KNB/bal e CWP/bal
	CV=0,5	KNB/step, KNB/LC, CWP/step e TPC/seg	KNB/step e CWP/step	KNB/LC e CWP/bal
	CV=1,0	TPC/seg	KNB/step e CWP/step	KNB/step
médio	CV=0,2	CWP/Bal	CWP/Bal	KNB/bal e CWP/bal
	CV=0,5	KNB/LC e KNB/step	CWP/Bal	KNB/bal e CWP/bal
	CV=1,0	TPC/seg	KNB/step	KNB/step e CWP/step
alto	CV=0,2	CWP/Bal	CWP/bal	CWP/bal
	CV=0,5	KNB/step	KNB/bal e CWP/bal	KNB/bal e CWP/bal
	CV=1,0	TPC/seg	CWP/step	CWP/bal

Mais uma vez, deve-se evitar generalizações destes resultados, já que estes advieram de situações bastante particulares, as quais estão contidas nos modelos utilizados para simulação e foram oportunamente discutidas ao longo deste trabalho.

5.3 Limitações do trabalho e trabalhos futuros

A pesquisa aqui desenvolvida calçou-se numa série de hipóteses simplificadoras que limitam a capacidade de generalização dos resultados alcançados. Exemplos destas hipóteses simplificadoras já foram mencionadas anteriormente, como número de recursos, um único produto, ausência de operações de montagem, disponibilidade infinita de matéria-prima, demanda infinita, entre outras. Desta forma, novos trabalhos deveriam agora ser realizados de modo que tais simplificações sejam minimizadas.

Sistemas como o TPC, por exemplo, foram desenvolvidos com a finalidade de se permitir que recursos restritivos sejam localizados e explorados em ambientes de alta complexidade, onde sistemas outros como o MRP (*Material Requirements Planning*), o MRP II (*Manufacturing Resources Planning*), e mesmo os sistemas Kanban e CONWIP, tenham sua aplicabilidade limitada. Desta feita, estudar-se a factibilidade e viabilidade de sistemas TPC em plantas como as aqui pesquisadas podem levar a sub-utilizações destes sistemas.

Para a Teoria das Restrições, extrair o máximo de capacidade de um recurso restritivo não significa apenas fazê-lo trabalhar o tempo todo, mas, sim também produzir aqueles itens que mais contribuem para o resultado global da empresa. “Se explorar a restrição significa fazê-la funcionar continuamente, então a composição do inventário não é relevante. Mas, este não é o caso. Explorar a restrição significa extrair o máximo dela (em termos da meta predeterminada)... Apenas quando lidamos com um único produto, o significado de EXPLORAR passa para ‘fazê-la funcionar o tempo todo’”, (GOLDRATT, 1991, p. 111).

No entanto, como já dito, os modelos criados abordam apenas um único tipo de produto, o que inviabiliza quaisquer sistemas de programação que buscam a otimização dos recursos via técnicas de sequenciamento. Neste ponto, vale ressaltar que o CONWIP também emprega ou sugere que materiais sejam liberados para a fábrica segundo uma seqüência que melhor utilize a capacidade limitada dos recursos gargalos. Dos argumentos acima, pode-se assumir, portanto, que os sistemas tipo Kanban talvez melhor se ajustem aos modelos aqui adotados. Elaborar modelos que representem a produção de mais de um produto seria de grande interesse para atenuar estas simplificações.

Outro aspecto, a baixa complexidade dos roteiros de produção, também pode cooperar com os bons resultados apresentados pelos sistemas Kanban e CONWIP. Como afirmam SPEARMAN et al. (1990), o TPC é mais geral que o CONWIP, pois aquele pode ser aplicado a ambientes tipo *job-shop* enquanto o CONWIP não. Desta forma, ao se fazer usos dos modelos aqui propostos, o sistema TPC pode estar sendo testado em ambientes que pouco permitem extrair-se todo o seu potencial.

A pesquisa aqui desenvolvida está longe de encerrar todas as possibilidades de alocação de capacidades entre recursos de uma fábrica, assim como também de todas as variantes atualmente existentes para as técnicas de gestão da produção ou PCP. Novas possibilidades para ambas as áreas de conhecimento podem e devem ser testadas, com grandes possibilidades para que novas e importantes conclusões possam ser obtidas.

Também não se sabe o que poderia ocorrer quando duas variáveis, relacionadas às flutuações no fornecimento de peças e na demanda por produtos finais, passam a fazer parte dos modelos para pesquisa. A existência de uma demanda finita, por exemplo, permitiria que se impusesse o conceito de produção puxada, não só no Kanban e no CONWIP, mas também no TPC, a partir de uma elaboração do MPS (*Master Production Schedule*) em função do tambor. Tais características fariam dos modelos algo mais realistas cujas conseqüências quanto aos resultados são de difícil mensuração. Conferir estas características a novos modelos e estudá-los, seria de grande contribuição à pesquisa na área.

Novas variáveis de interesse para estudo também deveriam ser analisadas. Neste trabalho procurou-se estudar o potencial que cada combinação PCP/alocação possui em termos de exploração da capacidade instalada (*throughput*), alterando-se níveis de WIP, CV e graus de desbalanceamento. Incluindo-se novas características aos modelos, outras variáveis de interesse poderiam ser abordadas. Como exemplo pode-se citar: nível de cumprimento de prazos, flexibilidade a mudanças de *mix*, *lead time* e custos (como uma conseqüência do nível de estoques, investimento em equipamentos para produção e necessidades de horas-extras).

A maneira de se analisar os resultados também merece uma nova abordagem em pesquisas futuras. Nesta tese, buscou-se estudar duas variáveis de resposta simultaneamente, *throughput* e nível médio de WIP na linha, de uma maneira até certo ponto subjetiva, através da leitura de gráficos. O que se está propondo aqui é a construção de um modelo de análise que possa, de alguma maneira, ponderar o nível de importância de cada uma destas variáveis e calcular, para diversas situações, quais desempenhos foram mais positivos. A elaboração de uma função objetivo, com a determinação de pesos para o *throughput* e o nível médio de WIP na

linha, com as demais variáveis aparecendo como restrições do problema, é uma possibilidade a ser considerada em trabalhos futuros.

Por fim, acredita-se que o tipo de estudo aqui desenvolvido pode ser estendido aos casos relacionados à gestão de cadeias de suprimentos já que a logística predominante na gestão de uma cadeia de suprimentos nada mais é que uma extensão lógica dos processos logísticos internos a uma fábrica em particular. Para tal, novas hipóteses e ou novos parâmetros deverão ser incorporados aos modelos para que estes melhor se aproximem da realidade das cadeias de suprimentos.

5.4 Considerações finais

Os resultados aqui alcançados, ainda que forneçam importantes contribuições sobre o comportamento e as relações entre critérios de alocação de capacidades e sistemas de PCP, não permitem que se estabeleça uma regra geral que possibilite, de uma maneira clara e precisa, identificar qual critério de alocação de capacidades ou qual sistema de PCP é preferível para situações genéricas. O uso de sistemas de simulação parece ser mesmo o melhor caminho para que, caso a caso, se possa prever qual o provável comportamento de ambientes específicos de manufatura.

No entanto, pode-se dizer que a maior contribuição deste trabalho está no fato desta fornecer fortes indícios no sentido de afirmar que os desempenhos, tantos dos diversos critérios de alocação de capacidades quanto dos sistemas de PCP, estão não apenas intimamente interligados, mas também dependem do nível de WIP na linha, da maneira de se medir o WIP (máximo ou médio), do coeficiente de variabilidade dos tempos de processamento dos recursos e até mesmo do grau de desbalanceamento das linhas.

Desta forma, um determinado sistema de PCP pode ser muito bom para situações particulares e não tão bom para outras. Certo critério de alocação de capacidades pode ser muito eficiente quando aplicado a determinado sistema de PCP e pouco eficiente em outros. Assim, o que se espera com os resultados aqui alcançados é que os temas “projetos de linhas” e “sistemas de PCP” deixem de ser tratados de maneira isolada e independente e passem a fazer parte de um conjunto único de estudo, não apenas para fins acadêmicos, mas também nas aplicações reais de chão-de-fábrica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGGARWAL, S.C. (1985). MRP, JIT, OPT, FMS? Making sense of production operations systems. *Harvard Business Review*, v.63, n.5, p.8-16, Sep/Oct.
- ATWATER, J. B.; CHAKRAVORTY, S.S. (1994). Does protective capacity assist managers in competing along time-based dimensions?. *Production and Inventory Management Journal*, third quarter, p.53-59.
- BANKS J.; CARSON, J.S.; SY, J.N. (1989). *Getting started with GPSS/H*. Wolverine Software Corporation. Annandale, VA.
- BERKLEY, B.J. (1991). Tandem queues and kanban-controlled lines. *International Journal of Production Research*, v.29, n.10, p.2057-81.
- BONVIK, A.M.; COUCH, C.E.; GERSHWIN, S.B. (1997). A comparison of production-line control mechanisms. *International Journal of Production Research*, v.35, n.3, p. 789-804.
- BURBIDGE, J.L. (1990). Production Planning and Control - A personal Philosophy. *Production Planning & Control*, v.1, n.1, p.3-16.
- CALIA C.G. (1995). *Logística da produção*. São Paulo. /Notas de curso ministrado pelo Avraham Y. Goldratt Institute do Brasil/
- CHAKRAVORTY, S. S.; ATWATER, J. B. (1996). A comparative study of line design approaches for serial productions systems. *International Journal of Operations and Production Management*, v.16, n.6, p. 91-108.

- CHANG, T.M.; YIH, Y. (1994). Generic kanban systems for dynamic environments. *International Journal of Production Research*, v.32, n.4, p. 889-902.
- CONWAY, R.; MAXWELL, W.; MCCLAIN, J.O.; THOMAS, L.J. (1988). The role of work-in-process inventory in serial production lines. *Operations Research*, v.36, n.2, p.229-241.
- COOK, D.P. (1994). A simulation comparison of traditional, JIT, and TOC manufacturing systems in a flow shop with bottlenecks. *Production and Inventory Management Journal*, first quarter, p.73-78.
- CORBETT NETO, T. (1996). *Uma comparação entre "Activity-Based Costing" e Teoria das Restrições, no contexto da contabilidade gerencial*. São Paulo. Dissertação (Mestrado) - Escola de Administração de Empresas de São Paulo, Fundação Getúlio Vargas.
- CORRÊA, H.L.; GIANESI, I.G.N. (1994). *Just In Time, MRP II e OPT: um enfoque estratégico*. São Paulo, Atlas.
- DAVIS, L.E. (1966). Pacing effects on manned assembly lines. *International Journal of Production Research*, v.4, n.3, p.171-184.
- DONOHUE, K.L.; SPEARMAN, M.L. (1993). Improving the design of stochastic production lines: an approach using perturbation analysis. *International Journal of Production Research*, v.31, n.12, p.2789-2806.
- EL-RAYAH, T.E. (1979a). The efficiency of balanced and unbalanced production lines. *International Journal of Production Research*, v.17, n.1, p.61-75.
- EL-RAYAH, T.E. (1979b). The effect of inequality of interstage buffer capacities and operations time variability on the efficiency of production line systems. *International Journal of Production Research*, v.17, n.1, p.77-89.

- FAWCETT, S.E.; PEARSON, J.N. (1991). Understanding and applying constraint management in today's manufacturing environments. *Production and Inventory Management Journal*, v.32, n.3, p.46-55.
- FRY, T.D.; RUSSELL, G.R. (1993). Capacity allocation strategies in a hypothetical job-shop. *International Journal of Production Research*, v.31, n.5, p.1097-1115.
- GARDINER, S.C.; BLACKSTONE JR, J.H.; GARDINER, L.R. (1993). Drum-buffer-rope and buffer management: impact on production management study and practices. *International Journal of Operations and Production Management*, v.13, n.6, p.68-78.
- GOLDRATT, E.M. (1981). The unbalanced plant. *APICS 24th Annual International Conference Proceedings*.
- GOLDRATT, E.M. (1988). Computadorized shop floor scheduling. *International Journal of Production Research*, v.26, n.3, p.443-455.
- GOLDRATT, E. M. (1991). *A síndrome do palheiro: garimpando informação num oceano de dados*. São Paulo, IMAM.
- GOLDRATT, E.M. (1998). *Corrente Crítica*. São Paulo, Nobel.
- GOLDRATT, E.M.; COX, J. (1995). *A meta: um processo de aprimoramento contínuo*. São Paulo, Educator.
- GOLDRATT, E.M.; FOX, R.E. (1989). *A corrida*. São Paulo, IMAM.
- GSTETTNER, S.; KUHN, H. (1996). Analysis of production control systems kanban and CONWIP. *International Journal of Production Research*, v.34, n.11, p.3253-3273.
- HILLIER, F. S.; BOLING, R. W. (1966). The effect of some design factors on the efficiency of production lines with variable operations times. *The Journal Of Industrial Engineering*, v.17, n.12, p.651-658.

- HILLIER, F. S.; BOLING, R. W. (1967). Finite queues in series with exponential or Erlang service times-a numerical approach. *Operations Research*, v.15, p.286-303.
- HILLIER, F. S.; BOLING, R. W. (1979). On the optimal allocation of work in symmetrically unbalanced production line systems with variable operation times. *Management Science*, v.25, n.8, p.721-728.
- HILLIER, F.S.; LIEBERMAN, G.J. (1988). *Introdução à pesquisa operacional*. São Paulo, Campus.
- HILLIER, F.S.; SO, K.C. (1993). Some data for applying the bowl phenomenon to large production line systems. *International Journal of Production Research*, v.31, n.4, p.811-822.
- HILLIER, F.S.; SO, K.C. (1996). On the robustness of the bowl phenomenon. *European Journal of Operational Research*, v.89, p.496-515.
- HILLIER, F.S.; SO, K.C. ; BOLING, R. W. (1993). Notes: toward characterizing the optimal allocation of storage space in production line systems with variable processing times. *Management Science*, v.39, n.1, p.126-133.
- HOBBS JR, O.K. (1997). Managing JIT toward maturity. *Production and Inventory Management Journal*, first quarter, p.47-50.
- HOPP, W. J.; SPEARMAN, M.L. (1996). **Factory Physics: Foundations of Manufacturing Management**. Boston, Massachusetts. Irwin/McGraw-Hill.
- HUANG, C.C.; KUSIAK, A. (1998). Manufacturing control with a push-pull approach. *International Journal of Production Research*, v.36, n.1, p.251-275.
- KARWAN, K. R.; PHILIPOOM, P. R. (1989). A note on "Stochastic unpaced line design: review and further experimental results". *Journal of Operations Management*, v.8, n.1, p.48-54.

- LAW, A.M. (1977). Confidence interval in discrete event simulation: A comparison of replication and batch means. *Naval Res. Logist. Quart.*, 24, p.667-678.
- LOCKAMY, A.; COX, J.F.; (1991). Using V-A-T analysis for determining the priority and location of JIT manufacturing techniques. *International Journal of Production Research*, v.29, n.8, p.1661-1672.
- MILTENBURG, J. (1997). Comparing JIT, MRP, and TOC, and embedding TOC into MRP. *International Journal of Production Research*, v.35, n 4 p.1147-1169.
- MISHRA, A.; ACHARYA, D.; RAO, N.P.; SASTRY, G.P. (1985). Composite stage effects in unbalancing of series production systems. *International Journal of Production Research*, v.23, n.1, p.1-20.
- MONDEN, Y. (1984). *Sistema Toyota de Produção*. São Paulo, IMAM.
- MUCKSTADT, J.A; TAYUR, S.R. (1995a). A comparison of alternative Kanban control mechanisms. I. Background and structural results. *IIE Transactions*, v.27, p.140-150.
- MUCKSTADT, J.A; TAYUR, S.R. (1995b). A comparison of alternative Kanban control mechanisms. II. Experimental results. *IIE Transactions*, v.27, p.151-161.
- NEWMAN, W.R.; SRIDHARAN, V. (1992). Manufacturing planning and control: is there one definitive answer? *Production and Inventory Management Journal*, first quarter, p.50-53.
- ODONI, A.R.; ROTH, E. (1983). An Empirical Investigation of the transient behavior of stationary queuing systems. *Operations Research*, v.31, n.3, p.432-455.
- PATTERSON, R.L. (1964). Markov processes occurring in the theory of traffic flow through an N-stage stochastic service system. *Journal of Industrial Engineering*, v.15, n.4, p.188-193.

- PAWLIKOWSKI, K. (1990). Steady-state simulation of queueing processes: a survey of problems and solutions. *ACM Computing Survey*, v.22, n.2, p.123-170.
- PAWLIKOWSKI, K. (1999). Simulation studies of telecommunication networks and their credibility. *Proceedings of the European Simulation Multiconference ESM'99*, Poland, June 1-4, v.1.
- PAYNE, S.; SLACK, N.; WILD, R. (1972). A note on the operating characteristics of 'balanced' and 'unbalanced' production flow lines. *International Journal of Production Research*, v.10, n.1, p.93-98.
- PIKE, R.; MARTIN, G.E. (1994). The bowl phenomenon in unpaced lines. *International Journal of Production Research*, v.32, n.3, p.483-499.
- PTAK, C.A. (1991). MRP, MRPII, OPT, JIT, and CIM: succession, evolution, or necessary combination. *Production and Inventory Management Journal*, v.32, n.2, p.7-11.
- RADOVILSKY, Z.D. (1998). A quantitative approach to estimate the size of the time buffer in the theory of constraints. *International Journal of Production Economics*, v.55, p.113-119.
- RAMSAY, M.L.; BROWN, S.; TABIBZADEH, K. (1990). Push, pull, and squeeze shop floor control with computer simulation. *Industrial Engineering*, v.22, n.2, p.39-45.
- RONEN, B.; STARR, M.K. (1990). Synchronized manufacturing as in OPT: from practice to theory. *Computers and Industrial Engineering*, v. 18, n.4, p.585-600.
- RUSSELL, G.R.; FRY, T.D. (1997). Order review/release and lot splitting in drum-buffer-rope. *International Journal of Production Research*, v.35, n.3, p.827-845.
- SARKER, B.R. (1984). Some comparative and design aspects of series production systems. *IIE Transactions*, 16, p. 229-239.

- SARKER, B.R.; HARRIS, R.D. (1988). The effect of imbalance in a just-in-time production system: a simulation study. *International Journal of Production Research*, v.26, n.1, p.1-18.
- SARKER, B.R.; FITZSIMMONS, J.A. (1989). The performance of push and pull systems: a simulation and comparative study. *International Journal of Production Research*, v.27, n.27, p.1715-31.
- SCHMEISER, B. (1982). Batch size effects in the analysis of simulation output. *Operations Research*, v.30, p.556-568.
- SCHRAGENHEIM, E.; RONEN, B. (1990). Drum-buffer-rope shop floor control. *Production and Inventory Management Journal*, third quarter, p.18-22.
- SCHRAGENHEIM, E.; RONEN, B. (1991). Buffer management: a diagnostic tool for production control. *Production and Inventory Management Journal*, second quarter, p.74-79.
- SCHRIBER, T.J. (1991). *An Introduction to Simulation using GPSS/H*. John Wiley & Sons, New York.
- SILVA, E.L.; MENEZES, E.M. (2001). Metodologia da pesquisa e elaboração de dissertação. Florianópolis, Laboratório de ensino à distância da UFSC.
- SIMONS JR, J.V.; SIMPSON III, W.P.; CARLSON, B.J.; JAMES, S.W.; LETTIERE, C.A.; MEDIATE JR, B.A. (1996). Formulation and solution of the drum-buffer-rope constraint scheduling problem (DBRCSP). *International Journal of Production Research*, v.34, n.9, p.2405-2420.
- SMUNT, T.L.; PERKINS, W.C. (1985). Stochastic unpaced line design: review and further experimental results. *Journal of Operations Management*, v.5, n.3, p.351-373.
- SMUNT, T.L.; PERKINS, W.C. (1989). Stochastic unpaced line design: a reply. *Journal of Operations Management*, v.8, n.1, p.55-62.

- SMUNT, T.L.; PERKINS, W.C. (1990). The efficiency of unbalancing production lines: an alternative interpretation. *International Journal of Production Research*, v.28, n.6, p.1219-1220.
- SO, K.C. (1989). On the efficiency of unbalancing production lines. *International Journal of Production Research*, v.27, n.4., p.717-729.
- SO, K.C. (1990). On the efficiency of unbalancing production lines: a reply to an alternative interpretation. *International Journal of Production Research*, v.28, n.6., p.1221-1222.
- SOUZA, F.B. (1997). *Fundamentos de Teoria das Restrições e uma aplicação em uma Metodologia de Integração de Empresa*. São Carlos. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- SPEARMAN, M.L.; WOODRUFF, D.L.; HOPP, W.J. (1990). CONWIP: a pull alternative to Kanban. *International Journal of Production Research*, v.28, n.5, p.879-894.
- SPEARMAN, M.L.; ZAZANIS, M.A. (1992). Push and pull production systems: issues and comparisons. *Operations Research*, v.40, n.3, p.521-532.
- SPENCER, M.S. (1991). Using "The Goal" in an MRP system. *Production and Inventory Management Journal*, fourth quarter, p.22-27.
- SPENCER, M.S.; COX, J.F. (1995a). Master production scheduling development in a theory of constraints environment. *Production and Inventory Management Journal*, first quarter, p.8-13.
- SPENCER, M.S.; COX, J.F. (1995b). Optimum Production Technology (OPT) and the Theory of Constraints (TOC): analysis and genealogy. *International Journal of Production Research*, v.33, n.6, p.1495-1504.
- SPENCER, M.S.; COX, J.F. (1995c). The role of MRP in repetitive manufacturing. *International Journal of Production Research*, v.33, n.7, p.1881-99.

- STÄHL, I. (1999). Learning micro-GPSS over the web. *Proceedings of the European Simulation Multiconference ESM'99*, Poland, June 1-4, v.1.
- STEELE, D.C.; PARKE-SHIELDS, K.E. (1993). Capacity slack: strategic alternative to lead time. *Production and Inventory Management Journal*, fourth quarter, p.1-5.
- STEIN, R.E. (1997). **The Theory of Constraints: Applications in Quality and Manufacturing**. New York, N.Y. Marcel Dekker, Inc.
- TAKAHASHI, K.; NAKAMURA, N.; OHASHI, K. (1996). Order release in JIT production systems: a simulation study. *Simulation*, v.66, n.2, p.75-87.
- TAYUR, S. R. (1993). Structural properties and a heuristic for kanban-controlled serial lines. *Management Science*, v.39, n.11, p.1347-1358.
- THOMPSON JUNIOR., W.W.; BURFORD, R.L. (1988). Some observations on the bowl phenomenon. *International Journal of Production Research*, v.26, n.8, p.1367-73.
- UMBLE, M.M.; SRIKANTH, M.L. (1990). *Synchronous Manufacturing: principles for world class excellence*. Cincinnati, South-Western.
- WESTON JUNIOR, F.C. (1999). Locating the constraint. *IIE Solutions*, v.31, n.5, p.34-39.
- WIGHT, O. (1970). Input/output control a real handle on lead time. *Production and Inventory Management*, v.11, n.3, p.9-31.

OBRAS CONSULTADAS

- ANSARI, A.; MODARRESS, B. (1995). Wireless Kanban. *Production and Inventory Management Journal*, first quarter, p.60-64.
- AYHAN, H.; WORTMAN, M.A. (1999). An approximation for computing the throughput of closed assembly-type queueing networks. *European Journal of Operational Research*, v.112, p.107-121.
- BARD, J.F.; GOLANY, B. (1991). Determining the number of kanbans in a multiproduct, multistage production system. *International Journal of Production Research*, v.29, n.5, p.881-895.
- BARTEN, K. (1962). A queueing simulator for determining optimum inventory levels in a sequential process. *Journal of Industrial Engineering*, v.13, n.4, p.245-252.
- CARNALL, C.A.; WILD, R. (1976). The location of variable work stations and the performance of production flow lines. *International Journal of Production Research*, v. 14, n.6, p.703-710.
- CHU, C.; SHIH, W. (1992). Simulation studies in JIT production. *International Journal of Production Research*, v.30, n.11, p.2573-2586.
- COLEMAN, B.J.; VAGHEFI, M.R. (1994). Heijunka (?): a key to the Toyota production system. *Production and Inventory Management Journal*, fourth quarter, p.31-35.
- CSILLAG, J.M. (1991). O significado do Mundo do Ganho. *Revista de Administração de Empresas*, v.31, n.2, p.61-8, abr./jun.

- DAR-EL, E.M.; HERER, Y.T.; MASIN, M. (1999). CONWIP-based production lines with multiples bottlenecks: performance and designers implications. *IIE Transactions*, v.31, p.99-111.
- DE LA WYCHE, P.; WILD, R. (1977). The design of imbalanced series queue flow lines. *Operational Research Quarterly*, v.28, n.3, p.695-702.
- DUDLEY, N.A. (1963). Work-time distributions. *International Journal of Production Research*, v.2, n.2, p.137-144.
- DUENYAS, I.; HOPP, W.J.; SPEARMAN, M. L. (1993). Characterizing the output process of a CONWIP line with deterministic processing and random outages. *Management Science*, v.39, n.8, p.975-988.
- DUENYAS, I. (1994). Estimating the throughput of a cyclic assembly system. *International Journal of Production Research*, v.32, n.6, p.1403-1419.
- DURI, C.; FREIN, Y.; LEE, H.S. (2000). Performance evaluation and design of a CONWIP system with inspections. *International Journal of Production Economics*, v.64, p.219-229.
- FINCH, B.J.; COX, J.F. (1989). Strategic use of WIP inventory: the impact of bill-of-material shape and plant type. *Production and Inventory Management Journal*, first quarter, p.63-66.
- FRY, T.D. (1992). Manufacturing performance and cost accounting. *Production and Inventory Management Journal*, third quarter, p.30-35.
- GIAUQUE, W.C.; SAWAYA, W.J. (1992). Strategies for production control. *Production and Inventory Management Journal*, third quarter, p.36-39.
- GOLANY, B.; DAR-EL, E.M.; ZEEV, N. (1999). Controlling shop floor operations in a multi-family, multi-cell manufacturing environment through constant work-in-process. *IIE Transactions*, v.31, n.8, p. 771-781.

- GUIDE JR, V.D.R.; GHISELLI, G.A. (1995). Implementation of drum-buffer-rope at a military rework depot engine works. *Production and Inventory Management Journal*, third quarter, p.79-82.
- GUIDE JR, V.D.R. (1996). Scheduling using drum-buffer-rope in a remanufacturing environment. *International Journal of Production Research*, v. 34, n.4, p.1081-1091.
- GUIDE JR, V.D.R. (1997). Scheduling with priority dispatching rules and drum-buffer-rope in a recoverable manufacturing system. *International Journal of Production Economics*, v.53, p.101-116.
- HERER, Y.T.; MASIN, M. (1997). Mathematical programming formulation of CONWIP based productions lines; and relationships to MRP. *International Journal of Production Research*, v.35, n.4, p.1067-1076.
- HOPP, W.J.; SPEARMAN, M.L. (1991). Throughput of a constant work in process manufacturing line subject to failures. *International Journal of Production Research*, v.29, n.3, p.635-655.
- HOPP, W. J.; SPEARMAN, M.L.; DUENYAS, I. (1993). Economic production quotas for pull manufacturing systems. *IEE Transactions*, v.25, n.2, p.71-79.
- HUANG, M.; WANG, D.; IP, W.H. (1998). Simulation study of CONWIP for a cold rolling plant. *International Journal of Production Economics*, v.54, p.257-266.
- KARMARKAR, U.S. (1987). Lot sizes, lead times and in-process inventories. *Management Science*, v.33, n.3, p.409-418.
- KALA, R.; HITCHINGS, G.G. (1973). The effects of performance time variance on a balanced four station manual assembly line. *International Journal of Production Research*, v. 11, n.4, p.341-353.

- KIM, I. (1998). Managing variances in manufacturing system design. *European Journal of Operational Research*, v.109, p.571-586.
- KLUSEWITZ, G.; RERICK, R. (1996). Constraint management through the drum-buffer-rope system. *IEEE/SEMI Advanced Semiconductor Manufacturing Conference and Workshop*, p.7-12.
- KOTTAS, J.F.; LAU, H. (1981). Some problems with transient phenomenon when simulating unpaced lines. *Journal of Operations Management*, v.1, n.3, p.155-164.
- KRAJEWSKI, L.J.; KING, B.E.; RITZMAN, L.P.; WONG, D.S. (1987). Kanban, MRP, and shaping the manufacturing environment. *Management Science*, v.33, n.1, p.39-57.
- LAMBRECHT, M.; SEGAERT, A. (1990) Buffer stock allocation in serial and assembly type of production lines. *International Journal of Production and Operations Management*, v.10, n.2, p.47-61.
- LOBÃO, E.C.; PORTO, A.J.V. (1997). Proposta para sistematização de estudos de simulação. XVII ENEGEP, Gramado, RS.
- MAK, K.L. (1986). The allocation of interstage buffer storage capacity in production lines. *Computers and Industrial Engineering*, v.10, n.3, p.163-169.
- MARTIN, D.P. (1997). How the law of unanticipated consequences can nullify the theory of constraints: the case for balanced capacity in a semiconductor manufacturing line. *IEEE/SEMI Advanced Semiconductor Manufacturing Conference and Workshop*, p.380-385.
- MUTH, E.J.; ALKAFF, A. (1987). The bowl phenomenon revisited. *International Journal of Production Research*, v.25, n.2, p.161-173.
- MURALIDHAR, K.; SWENSETH, S.R.; WILSON, R.L. (1992). Describing processing time when simulating JIT environments. *International Journal of Production Research*, v.30, n.1, p.1-11.

NEELY, A.D.; BYRNE, M.D. (1992). A simulation study of bottleneck scheduling. *International Journal of Production Economics*, v.26, n.1-3, p.187-192.

NOREEN, E.; SMITH, D.; MACKEY, J.T. (1996). *A Teoria das Restrições e suas implicações na contabilidade gerencial*. São Paulo, Educator.

PARK, P.S. (1993). Uniform plant loading through level production. *Production and Inventory Management Journal*, second quarter, p.12-17.

PATTERSON, M.C. (1993). Analysis of setup time at constraint resources. *International Journal of Production Research*, v.31, n.4, p.845-849.

PHILIPHOOM, P.R.; FRY, T.D. (1992). Capacity-based order review/release strategies to improve manufacturing performance. *International Journal of Production Research*, v.30, n.11, p.2559-2572.

PIRES, S. (1995). *Gestão Estratégica da Produção*. Piracicaba, UNIMEP.

PLANTULLO V.L. (1994). Um pouco além do Just In Time: uma abordagem à Teoria das Restrições. *Revista de Administração de Empresas*, v.34, n.5, p.32-9, set./out.

RAGATZ, G.L.; MABERT, V.A (1988). An evaluation of order release mechanism in a job shop environment. *Decision Science*, v.19, n.1, p.167-189.

RAHMAN, S. (1998). Theory of constraints: a review of the philosophy and its applications. *International Journal of Operations and Production Management*, v.18, n.4, p.336-355.

REES, L.P.; HUANG, P.Y.; TAYLOR, B.W. (1989). A comparative analysis of an MRP lot-for-lot system and a Kanban system for a multistage production operation. *International Journal of Production Research*, v.27, n.8, p.1427-1443.

- RODERICK, L.M.; TOLAND, J.; RODRIGUEZ, F.P. (1994). A simulation study of CONWIP versus MRP at Westinghouse. *Computers and Industrial Engineering*, v.26, n.2, p.237-242.
- RONEN, B.; SPECTOR, Y. (1992). Managing system constraints: a cost/utilization approach. *International Journal of Production Research*, v.30, n.9, p.2045-2061.
- RUELLE, O. (1997). Continuous flow manufacturing: the ultimate theory of constraints. *IEEE/SEMI Advanced Semiconductor Manufacturing Conference and Workshop*, p.216-221.
- SCHRAGENHEIM, E.; COX, J.; RONEN, B. (1994). Process flow industry - scheduling and control using theory of constraints. *International Journal of Production Research*, v. 32, n.8, p.1867-1877.
- SIHA, S. (1994). The pull production system: modeling and characteristics. *International Journal of Production Research*, v.32, n.4, p.933-949.
- SLACK, N.; CHAMBERS, S.; HARLAND, C.; HARRISON, A.; JOHNSTON, R. (1996). *Administração da Produção*. São Paulo, Atlas.
- SPEARMAN, M.L. (1992). Customer service in pull production systems. *Operations Research*, v.40, n.5, p.948-958.
- STALK JR, G. (1988). Time-the next source of competitive advantage. *Harvard Business Review*, Jul./Aug., p.41-51.
- SUGIMORI, Y., KUSUNOKI, K., CHO, F.; UCHIKAWA, S. (1977). Toyota production system and Kanban system materialization of just-in-time and respect-for-human systems. *International Journal of Production Research*, v.15, n.6, p.553-564.
- TAAL, M.; WORTMANN, J.C. (1997). Integrating MRP and finite capacity planning. *Production Planning and Control*, v. 8, n.3, p.245-254.

- UMBLE, M.M. (1992). Analyzing manufacturing problems using V-A-T analysis. *Production And Inventory Management Journal*, v.33, n.2, p.55-60.
- VEATCH, M.H.; WEIN, L.M. (1994). Optimal control of a two-station tandem production/inventory system. *Operations Research*, v. 42, n.2, 337-350.
- WAHLERS, J.L.; COX, J.F. (1994). Competitive factors and performance measurement: applying the theory of constraints to meet customers needs. *International Journal of Production Economics*, v.37, p.229-240.
- WESTON JR, F.C. (1991). Function goals are often in conflict with each other. *Industrial Engineering*, v.23, n.11, p.25-9, Nov.
- WU, S.Y.; MORRIS, J.S.; GORDON, T.M. (1994). A simulation analysis of the effectiveness of drum-buffer-rope scheduling in furniture manufacturing. *Computers and Industrial Engineering*, v.26, n.4, p.757-764.
- YAMASHITA, H.; ALTIOK, T. (1998). Buffer capacity allocation for a desired throughput in production lines. *IIE Transactions*, v.30, n.10, p.883-891.
- YAVUZ, I.H.; SATIR, A. (1995). A Kanban-based simulation study of a mixed model just-in-time manufacturing line. *International Journal of Production Research*, v.33, n.4, p. 1027-1048.

GLOSSÁRIO

Sistemas de gestão da produção: são as técnicas de planejamento e controle da produção ou abreviadamente PCP. Deve-se registrar que devido à simplicidade dos modelos aqui confeccionados, a idéia de programação ficou bastante restrita e limitada, fazendo com que a principal diferença entre os sistemas de PCP estejam nas técnicas de controle da produção. Termos como “sistemas de gestão da produção”, “planejamento e controle da produção (PCP)” ou, simplesmente, “controle da produção” serão usados indistintamente ao longo do texto.

Capacidades de produção: é o potencial produtivo de um recurso de manufatura. Pode ser expresso em peças/hora. Outra forma de se designar capacidade produtiva é através dos tempos de processamento (tempo/peça). Porém, deve-se atentar para o fato que tempos de processamento e capacidades produtivas são relações inversas, ou seja, quanto maior o tempo de processamento menor a capacidade de produção do recurso.

Tempos de processamento: são os tempos gastos por um recurso para finalizar um item de produção. São também conhecidos como tempo de ciclo ou tempo de serviço. Quando o objetivo é referenciar o tempo de processamento total de uma linha (soma de todos os tempos de processamento), a idéia ficará evidente dentro do contexto, através do uso de termos como tempo de processamento total.

Critérios de alocação de capacidades produtivas entre recursos de uma linha de manufatura: são as diversas maneiras com que capacidades produtivas ou tempo de processamento são distribuídos entre recursos de uma linha de produção. Aqui serão utilizados nomes como critérios, métodos ou metodologias de alocação de capacidades produtivas ou de alocação de tempos de processamento.

Estoque em processo: refere-se a todo estoque de material produtivo presente na linha de produção, com exceção de matéria-prima e produto acabado. Para simplificação, será utilizada ao longo do trabalho a sigla WIP, do inglês “*work in process*”, para representá-lo.

Coefficiente de variabilidade dos tempos de processamento: são as variações em torno do tempo médio de processamento causadas por diversas fontes, como aquelas inerentes ao processo de produção, às quebras do equipamento, às necessidades de *set-up*, aos retrabalhos etc. Como medida de variabilidade será aqui utilizado o índice coeficiente de variabilidade (CV).

Desbalanceamento de linha: são as alocações desiguais de capacidades produtivas entre recursos de manufatura de uma linha. Estas diferenças entre capacidades produtivas podem estar relacionadas a diferentes tempos médios de processamento ou a diferentes CV para estes tempos de processamento ou ainda ambos. No entanto, linhas desbalanceadas deverão ser aqui entendidas no transcorrer do trabalho como aquela cujo ao menos um recurso possua um tempo médio de processamento diferente em relação a quaisquer outros recursos da mesma linha.

Recursos: são estações de trabalho, máquinas ou elementos produtivos. Quando a intenção é referir-se a um grupo de máquinas ou recursos será aqui utilizado o termo célula de trabalho ou simplesmente célula.