

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

**SIMULAÇÃO DE SISTEMAS DE COORDENAÇÃO DE ORDENS
EM AMBIENTE DE PRODUÇÃO *FLOW SHOP***

Stella Jacyszyn Bachega

**SÃO CARLOS
2013**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

**SIMULAÇÃO DE SISTEMAS DE COORDENAÇÃO DE ORDENS EM AMBIENTE
DE PRODUÇÃO *FLOW SHOP***

Stella Jacyszyn Bachega

**Tese apresentada ao Programa de Pós-
Graduação em Engenharia de Produção da
Universidade Federal de São Carlos, como
parte dos requisitos para obtenção do Título
de Doutor em Engenharia de Produção
Área de Concentração: Planejamento e
Controle de Sistemas Produtivos
Orientador: Prof. Dr. Moacir Godinho
Filho**

**SÃO CARLOS
2013**

**Ficha catalográfica elaborada pelo DePT da
Biblioteca Comunitária/UFSCar**

B119ss Bachega, Stella Jacyszyn.
Simulação de sistemas de coordenação de ordens em ambiente de produção *flow shop* / Stella Jacyszyn Bachega. -- São Carlos : UFSCar, 2013.
200 f.

Tese (Doutorado) -- Universidade Federal de São Carlos, 2013.

1. Pesquisa operacional. 2. Simulação. 3. Controle de produção. 4. Sistema de coordenação de ordens. 5. Indústria automobilística. I. Título.

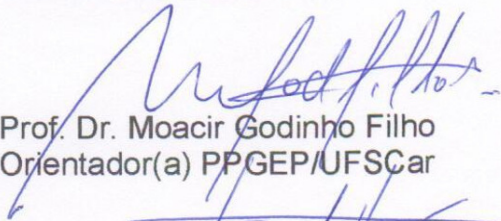
CDD: 658.4034 (20^a)



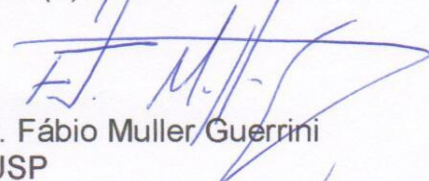
FOLHA DE APROVAÇÃO

Aluno(a): Stella Jacyszyn Bachega

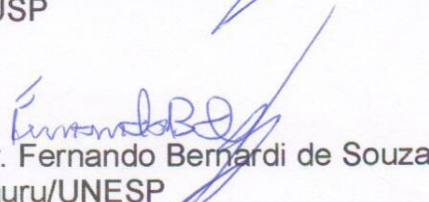
TESE DE DOUTORADO DEFENDIDA E APROVADA EM 18/02/2013 PELA
COMISSÃO JULGADORA:



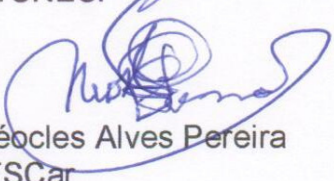
Prof. Dr. Moacir Godinho Filho
Orientador(a) PPGEp/UFSCar



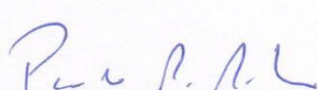
Prof. Dr. Fábio Muller Guerrini
EESC/USP




Prof. Dr. Fernando Bernardi de Souza
FEB-Bauru/UNESP



Prof. Dr. Néocles Alves Pereira
PPGEp/UFSCar



Prof. Dr. Paulo Rogério Politano
DC/PPGEp/UFSCar



Prof. Dr. Mário Otávio Batalha
Coordenador do PPGEp

Dedico esta tese aos meus pais,
ao meu marido e a Deus.

*“Smile, though your heart is aching
Smile, even though it's breaking
When there are clouds in the sky
You'll get by...
If you smile
With your fear and sorrow
Smile and maybe tomorrow
You'll see the sun come shining through, for you
Light up your face with gladness
Hide every trace of sadness
Although a tear may be ever so near
That's the time you must keep on trying
Smile, what's the use of crying?
You'll find that life is still worthwhile
If you'll just smile
That's the time you must keep on trying
Smile, what's the use of crying?
You'll find that life is still worthwhile
If you'll just smile.”*

(Charles Chaplin)

AGRADECIMENTOS

Agradeço sinceramente a todos que contribuíram para a realização desta tese de doutorado, especialmente:

A Deus e aos meus amados pais, Alécio Graciano Bachega e Oksana Jacyszyn Bachega, que sempre proporcionaram apoio, compreensão e exemplo de profissionalismo, de ética e de família; ao meu amado marido, Dalton Matsuo Tavares, pela paciência, incentivo e companheirismo; e à minha querida irmã e querido sobrinho, Renata Jacyszyn Bachega e André Jacyszyn Bachega pelos momentos de alegria.

Ao meu orientador Prof. Dr. Moacir Godinho Filho, pelas orientações que tornaram possíveis a conclusão deste trabalho.

Aos professores Dr. Fábio Müller Guerrini, Dr. Fernando Bernardi de Souza, Dr. Néocles Alves Pereira, Dr. Paulo Rogério Politano, e Dr. Walther Azzolini Junior pelas preciosas sugestões e críticas dadas na qualificação e/ou defesa dessa tese.

Aos docentes do PPGEP/UFSCar, especialmente aos professores Dr. Roberto Antonio Martins, Dr. Miguel Antonio Bueno da Costa, Dr. Alceu Gomes Alves Filho, Dr. Sergio Luis da Silva, Dr. Roberto Fernandes Tavares Neto e ao professor Dr. João Eduardo Ramos da UFSCar/Sorocaba, que também contribuíram para meu aprimoramento profissional.

Aos amigos e colegas da UFSCar, EESC-USP, UFSC e UFPA, especialmente à Cristina, Maria, Mônica, Adriana, José, Gisele e Tatiany que me apoiaram e incentivaram direta ou indiretamente.

Aos participantes da pesquisa que pertencem à empresa estudada, pela disponibilidade em participar fornecendo valiosas informações.

Aos integrantes da PARAGON, principalmente ao Douglas Silva, ao Daniel Mota e ao Isac Santana, que forneceram preciosas informações sobre simulação e sobre o software Arena durante o curso realizado.

Aos funcionários do DEP/PPGEP, em especial ao Leandro Canali Ramos, à Raquel Ottani Boriolo, ao Robson Lopes dos Santos e à Karina dos Santos, pela cooperação e amizade.

RESUMO

Sistemas de Coordenação de Ordens (SCO) são sistemas de informação envolvidos com todas ou algumas das seguintes atividades do Planejamento e Controle da Produção (PCP): programar ou organizar/explodir as necessidades em termos de componentes e materiais; controlar a emissão/liberação das ordens de produção e compra, determinando se e quando liberar as ordens; programar/sequenciar as tarefas nas máquinas. Os SCO podem ser aplicados em ambientes de produção como *flow shop*, *job shop* e celular.

Esta pesquisa tem por objetivo geral comparar os sistemas de coordenação de ordens *kanban*, CONWIP e TBC (*kanban*-CONWIP) em um caso real que possui ambiente de produção *flow shop* e propor um mapa mental (*mind map*) com características que auxiliem na escolha de SCO. Para realizar este objetivo, foram utilizados os métodos de pesquisa teórico-conceitual, experimental, via simulação computacional, e estudo de caso em uma empresa automobilística.

Dentre os principais resultados obtidos para a empresa estudada, observou-se que, em uma análise global, o TBC e o *kanban* mostraram-se melhores que o CONWIP e o sistema empurrado (situação atual da empresa).

Quanto aos principais resultados da análise dos sistemas puxados em diversos cenários, na maioria desses, o CONWIP e o TBC estiveram presentes como geradores de maior *throughput* e o TBC e o *kanban* apresentaram os menores valores de WIP. Outro ponto a ser observado é que o *kanban* obteve melhor desempenho quanto a WIP e/ou *throughput* em cenários com altos coeficientes de variação de chegada e tempos de processamento, maior variedade de itens e com presença de gargalos na linha.

O auxílio ao procedimento de escolha do SCO mais apropriado na prática gerencial está em meio às contribuições do presente trabalho. Quanto à literatura de gestão da produção, essa tese origina informações importantes para a área de planejamento e controle da produção e apoia a efetuação de pesquisas futuras quanto a este tema.

Palavras-chave: Planejamento e Controle da Produção, Sistemas de Coordenação de Ordens, *Flow shop*, Simulação, Empresa Automobilística.

ABSTRACT

Systems for Coordination of Orders (SCO) are information systems involved in all or some of the following Production Planning and Control (PPC) activities: to schedule or organise material requirements, and/or to control the production and purchasing orders release, and/or to schedule jobs on machines. The SCO can be applied in production environments as flow shop, job shop and cellular manufacturing.

This research aims to compare the systems for coordination of orders kanban, CONWIP and TBC (kanban-CONWIP) in a real case that has as a flow shop production environment and propose a mind map with features that help in choosing the SCO. To accomplish this goal, we used the theoretical and conceptual research method, the experimental method, via computer simulation, and a case study in an automotive company.

Among the main results for the company studied, it was observed that, in a global analysis, the TBC and kanban proved better than the CONWIP and the push system (current company situation).

As to the main results of the analysis of pull systems in various scenarios, in most of these, the CONWIP and TBC were present as a generator of higher throughput and TBC and kanban had the lowest values of WIP. Another point to be noted is that the kanban performed better regarding WIP and/or throughput in scenarios with high coefficients of variation in arrival and processing times, greater variety of items and with the presence of bottlenecks in the line. The aid to the choosing procedure for the most appropriate SCO in management practice is among the contributions of this work. As for the literature of production management, this thesis originates important information for the area of PPC and supports the accomplishment of future research on this topic.

Keywords: Production Planning and Control, Systems for Coordination of Orders, Flow shop, Simulation, Automotive Company.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO	9
1.1 Apresentação do Trabalho	9
1.2 Objetivos, questões e proposições do trabalho	10
1.3 Metodologia de Pesquisa	12
1.3.1 Explicação científica.....	14
1.3.2 Abordagem de pesquisa.....	15
1.3.3 Métodos de pesquisa.....	16
1.4 Justificativa da importância do tema	22
1.5 Estrutura do trabalho	25
CAPÍTULO 2 – PLANEJAMENTO E CONTROLE DA PRODUÇÃO (PCP)	27
2.1 Considerações Iniciais	27
2.2 Definições de PCP	27
2.3 Horizontes de tempo versus PCP.....	28
2.4 Atividades de PCP	29
2.5 Relacionamento das atividades de PCP com as demais áreas e sistemas.....	32
2.6 Considerações Finais	35
CAPÍTULO 3 – SISTEMAS DE COORDENAÇÃO DE ORDENS (SCO)	37
3.1 Considerações Iniciais	37
3.2 Os SCO	37
3.3 Particularidades, vantagens, desvantagens e funcionamento de alguns SCO	39
3.3.1 <i>Kanban</i> CNE	39
3.3.2 CONWIP CNE	42
3.3.3 MRP.....	45
3.3.4 BSCS	47
3.3.5 TBC	50
3.3.6 GKCS	52
3.4 Considerações Finais	54
CAPÍTULO 4 – TRABALHOS QUE RELACIONAM UM OU MAIS SCO EM AMBIENTES <i>FLOW SHOP</i> COM USO DE SIMULAÇÃO.....	57
4.1 Considerações Iniciais	57
4.2 Revisão, classificação e estruturação da literatura sobre comparação de SCO em ambientes <i>flow shop</i> via simulação	57
4.3 Objetivos e principais resultados dos trabalhos analisados	66
4.4 Verificação das formas de análise e resultados dos trabalhos que possuem algum SCO compatível com os estudados na tese	74
4.5 Considerações Finais	81
CAPÍTULO 5 – MODELAGEM E SIMULAÇÃO DO CENÁRIO ATUAL DA LINHA DE EIXOS TRASEIROS.....	83
5.1 Considerações Iniciais	83
5.2 Breve histórico da empresa estudada	84
5.3 Formulação do problema e planejamento do estudo	85
5.4 Coleta de dados e definição do modelo	85
5.5 Validação do modelo conceitual.....	89
5.6 Construção do programa computacional e verificação.....	90
5.7 Realização de execuções piloto	95
5.8 Validação do modelo programado.....	95
5.9 Projeto dos experimentos	96
5.10 Realização das execuções de simulação	99

5.11 Análise de resultados	99
5.12 Documentação e implementação	101
5.13 Considerações finais	101
CAPÍTULO 6 – SIMULAÇÃO DE SCO COM CARACTERÍSTICAS PUXADAS PARA A EMPRESA ESTUDADA	103
6.1 Considerações Iniciais	103
6.2 Modelagem e Simulação do CONWIP.....	104
6.2.1 Otimização do número de cartões CONWIP.....	108
6.2.2 Análise dos resultados do modelo CONWIP	110
6.3 Modelagem e simulação do kanban	113
6.3.1 Otimização do número de cartões <i>kanban</i>	118
6.3.2 Análise dos resultados do modelo <i>kanban</i>	120
6.4 Modelagem e simulação do TBC	122
6.4.1 Otimização do número de cartões CONWIP e <i>kanban</i>	126
6.4.2 Análise dos resultados do modelo TBC	129
6.5 Análise dos resultados obtidos nos SCO simulados.....	130
6.6 Considerações finais	138
CAPÍTULO 7 – ANÁLISE DOS SISTEMAS CONWIP, KANBAN E TBC SIMULADOS EM DIFERENTES CENÁRIOS	140
7.1 Considerações Iniciais	140
7.2 Análise do cenário de demanda sob diversos coeficientes de variação.....	142
7.3 Análise do cenário de chegada dos eixos sob diversos coeficientes de variação	145
7.4 Análise do cenário com tempos de processamento sob diversos coeficientes de variação.....	147
7.5 Análise do cenário com gargalos na linha de produção	150
7.6 Análise do cenário com alteração na variedade de itens a serem produzidos	154
7.7 Análise dos resultados	157
7.8 Considerações finais	160
CAPÍTULO 8 – CONSIDERAÇÕES FINAIS	162
8.1 Considerações Gerais	162
8.2 Avaliação Geral do Objetivo e da Proposição.....	164
8.3 Comparação da tese com trabalhos que analisaram conjuntamente os SCO puxados	165
8.4 Contribuições do Trabalho e Propostas de Pesquisas Futuras.....	168
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	170
APÊNDICE A – ANOVA E MÉTODO DE COMPARAÇÕES MÚLTIPLAS DE SCHEFFÉ	182

LISTA DE ABREVIATURAS

BBC	Behavior-Based control
BSCS	Base Stock Control System
CNE	Controlado pelo nível de estoque
CONWIP	Constant Work in Process
DBR	Drum, Buffer, Rope
DEWIP	Decentralized Work in Process
EKCS	Extended Kanban Control System
ERP	Enterprise Resource Planning
GKCS	Generalized Kanban Control System
HPP	Hybrid Push/Pull
JIT	Just in Time
KOP	Kanban de ordem de produção
KR	Kanban de Retirada
LOOR	Load Oriented Order Release
MRP II	Manufacturing Resources Planning
MRP	Material Requirements Planning
OPT	Optimized Production Technology
PBC	Period Batch Control
PCP	Planejamento e Controle da Produção
PMP	Plano-mestre de Produção
RL	Reinforcement Learning
SCO	Sistemas de Coordenação de Ordens
TBC	Two-Boundary Control

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

1.1 Apresentação do Trabalho

As atividades de Planejamento e Controle da Produção (PCP) adquirem cada vez mais importância no âmbito empresarial, uma vez que vantagens competitivas são adquiridas e/ou sustentadas ao atender as necessidades de seus clientes. Portanto, o que, o quanto e quando produzir são tarefas de extrema relevância no processo decisório cotidiano das organizações, para garantir que o produto desejado esteja no local e no momento adequados e em quantidade correta para suprir os desejos dos clientes.

Conforme Godinho Filho (2004), as funções de PCP podem ser desmembradas em Planejamento da Produção e Controle da Produção. Fernandes (1991) aponta que as atividades de médio prazo, geralmente realizadas no período de 3 a 18 meses são consideradas Planejamento da Produção. Portanto, diz respeito às decisões, de modo agregado, do que, o quanto, quando produzir, comprar e entregar; e quem e/ou onde e/ou como produzir. Já o Controle da Produção opera no curto prazo (até 3 meses), tratando da regulação do fluxo de materiais em um sistema de produção por meio de informações e decisões para execução (GODINHO FILHO, 2004). Assim, trata também das decisões de o que, quanto e quando produzir, comprar e entregar e quem, onde e como produzir, mas com uma ressalva: tais decisões são tomadas com pouca antecedência, com rigor de detalhes e de forma desagregada.

Em ambientes dinâmicos e mutáveis, nos quais os sistemas produtivos estão passíveis de alterações nas variedades dos produtos e na complexidade de suas estruturas, as atividades de Controle da Produção tomam grande significância, principalmente as atividades denominadas de *ordering systems*, por Burbidge (1990), e redefinida como Sistemas de Coordenação de Ordens (SCO) por Fernandes e Godinho Filho (2007).

Conforme estes mesmos autores, um SCO:

“[...] programa ou organiza/explode as necessidades em termos de componentes e materiais e/ou controla a emissão/liberação das ordens de produção e compra e/ou Programa/Sequencia as tarefas nas máquinas. Portanto um SCO coordena as ordens de produção e de compras no chão de fábrica” (FERNANDES; GODINHO FILHO, 2007, p. 338).

Fernandes e Godinho Filho (2007) verificaram a existência de dezessete SCO e Fernandes e Godinho Filho (2011), complementando o trabalho anterior, notaram a existência de vinte SCO. Dentre esta diversidade de SCO presente na literatura é que se encontra o problema desta pesquisa. Algumas empresas necessitam identificar os SCO que realmente são

mais aplicáveis aos seus ambientes e características de produção e deixar de utilizar os SCO seguindo tendências e “modismos” gerenciais, somente porque tal sistema propiciou sucesso a uma determinada empresa.

Cabe destacar que, na tentativa de reduzir a lacuna existente entre a teoria e a prática do PCP, devemos considerar a máxima ‘cada caso é um caso’. Portanto, a aplicação de um SCO em uma organização pode propiciar um caso de sucesso e a mesma aplicação em outra empresa pode ocasionar um caso de insucesso, se algumas variáveis consideradas não correspondam aos pré-requisitos para implantação de dado sistema.

Os SCO podem ser aplicados em determinados ambientes de produção, por exemplo, os ambientes *flow shop*, *job shop* e o celular. Nesta pesquisa, os SCO analisados serão focados em um caso real que possui ambiente *flow shop*.

1.2 Objetivos, questões e proposições do trabalho

Agarwal e Sarkis (1998) fizeram uma revisão de literatura que aponta, dentre outros tópicos, medidas de desempenho utilizadas em estudos que comparam o desempenho de *layouts* funcionais e celulares. Dentre as medidas estão o tamanho da fila, WIP (*work in process*), WIP médio, tempo médio de fluxo, utilização média, tempo médio de *throughput*, dentre outras. Diversos autores, dentre eles, Krishnamurthy (2002), Geraghty e Heavey (2004) e Steele, Philipoom e Malhotra (2005), compararam SCO em ambientes *flow shop* por meio de simulação, considerando medidas de desempenho como WIP, custo, confiabilidade de entrega, nível de utilização, tempo no sistema etc.

Empresas como FIAT, STIHL, AST Computer, MICHELIN, Roca Celite, Gerdau, Votorantim, CORREIOS, PETROBRÁS (BELGE, 2011), Natura, Vale, Ford, Aracruz, Mercedes-Benz, Arcelor Mittal, ESSO e Pesi Américas (PARAGON, 2011) adotam e/ou adotaram projetos de simulação para melhorias nas áreas de manufatura e/ou logística, o que aponta demanda pelo uso de simulação em casos reais. Verificou-se nesses casos que o uso de simulação é mais aplicado em estudos de redução de *lead time*, estoque intermediário, turnos de trabalho, alocação de operadores, *layout*, dimensionamento de capacidade, *mix* de produção, substituição/análise de equipamentos, cadeia de suprimentos e transportes.

Takahashi e Nakamura (1998), Gaury, Pierreval e Kleijnen (2000), Karaesmen e Dallery (2000), Paternina-Arboleda e Das (2001), entre outros, advogam a importância de analisar e comparar SCO, por meio de técnicas como teoria das filas e simulação, para a verificação do melhor desempenho em casos reais e hipotéticos que possuem ambientes *flow*

shop. No entanto, notou-se nos trabalhos acadêmico-científicos maior uso de casos hipotéticos do que reais. Tal ponto será discutido no Capítulo 4 desta tese.

Gaury, Pierreval e Kleijnen (2000) advertem que comparações de estratégias de controle da produção somente fazem sentido quando as configurações ótimas são comparadas e que devem ser utilizadas medidas de desempenho condizentes com os sistemas. Além disso, MacDonald e Gunn (2008) advogam que a escolha da melhor estratégia de controle depende do desempenho desejado do sistema analisado.

Cabe ressaltar que a revisão de literatura realizada, exposta no Capítulo 4, identificou, dentre outros pontos, somente uma comparação exclusiva, via simulação em ambiente *flow shop*, dos sistemas *Kanban*, CONWIP e TBC, sendo esta análise realizada em um caso hipotético, com 6, 8 e 10 centros de trabalho e somente um tipo de item produzido (GAURY; PIERREVAL; KLEIJNEN, 2000). As medidas de desempenho usadas foram WIP e nível de serviço, e as outras configurações consideradas durante a análise foram o número de cartões *kanban* e número de cartões CONWIP. Outros dois trabalhos que também comparam os sistemas CONWIP, Kanban e TBC com outros sistemas foram identificados, sendo estes apresentados a seguir.

Bonvik, Couch e Gershwin (1997) também compararam esses sistemas juntamente com o *Minimal Blocking* e Estoque-base em um caso real com quatro centros de trabalho e somente um tipo de item produzido. As medidas de desempenho utilizadas foram nível de serviço, nível de WIP e variabilidade ao longo da linha, sendo que as demais configurações consideradas na análise do modelo foram tamanho do *buffer*, nível de estoque-base e falha de máquina.

Ainda, Paternina-Arboleda e Das (2001) analisaram os sistemas CONWIP, TBC e *kanban* juntamente com outros SCO em um caso hipotético, com quatro centros de trabalho e único tipo de item a ser produzido. Quanto às medidas de desempenho, foram analisados o nível médio de WIP, o nível médio de serviço e o custo médio de WIP.

Logo, ao analisar em profundidade os trabalhos explicitados no Capítulo 4, notou-se a possibilidade de direcionar a presente pesquisa para a análise e comparação dos sistemas *kanban*, CONWIP e TBC devido a pouca existência de trabalhos com esse foco.

Com base neste contexto, foi elaborada a seguinte proposição, que conduzirá essa tese de doutorado:

Proposição: A seleção do melhor sistema de coordenação de ordens depende das características do sistema produtivo. Assim, se a meta for reduzir estoque, um SCO será

melhor aplicável do que outros. No entanto, se o foco for reduzir custo, outro SCO pode ser melhor aplicável.

Assim, as principais questões de pesquisa identificadas para este trabalho são mostradas a seguir:

- 1) Quais medidas de desempenho são mais consideradas para a comparação dos sistemas de coordenação de ordens aplicados em ambientes *flow shop*, a serem estudados?
- 2) Até que ponto determinado SCO pode ser vantajoso para determinada empresa, considerando certas medidas de desempenho?

Portanto, nessa tese será perseguido o seguinte objetivo geral:

- Analisar e comparar o desempenho dos sistemas de coordenação de ordens *Kanban*, CONWIP e TBC (*Kanban-CONWIP*), segundo parâmetros preestabelecidos, em um caso real que possui ambiente de produção *flow shop* e propor um mapa mental (*mind map*) com características que auxiliem na escolha de SCO.

Os objetivos específicos da presente pesquisa, que auxiliarão na atividade de validar ou não as proposições levantadas, são:

- i) Aprofundar o conhecimento em sistemas de coordenação de ordens aplicados em ambientes *flow shop*;
- ii) Simular SCO com base em um caso real de ambiente *flow shop*;
- iii) Verificar o desempenho dos SCO simulados com base em parâmetros preestabelecidos.

1.3 Metodologia de Pesquisa

Pesquisa, segundo Gil (1996), pode ser conceituada como um processo racional e sistemático, com o objetivo de promover respostas aos problemas propostos, sendo desenvolvida por meio de um processo que envolve desde a formulação apropriada do problema até a apresentação dos resultados.

Ressalta-se que no corpo textual da tese houve a presença de uma revisão de literatura sobre os SCO, com intuito de pré-orientação teórica e para a definição das características que auxiliam na identificação de possíveis SCO a serem aplicados em um sistema produtivo real. Houve, também, o uso de experimentação por meio da simulação dos SCO aplicáveis em ambientes *flow shop* para análise e comparação dos sistemas. Além disso, foi realizado um estudo de caso, efetuado com a finalidade de compreender o ambiente real da empresa estudada.

Nesta seção, buscou-se discutir como a pesquisa foi conduzida, visando o alcance dos objetivos propostos. Assim, são apresentados na Figura 1.1 os principais passos realizados ao longo da pesquisa e os procedimentos de pesquisa utilizados neste trabalho. Também são mostrados os capítulos da tese nos quais foram desenvolvidas cada uma das etapas.

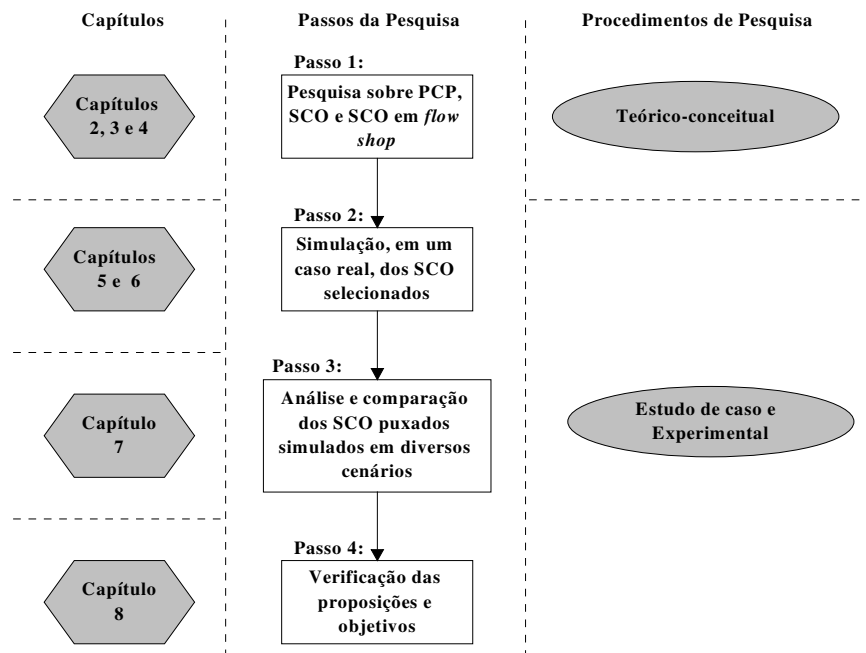


Figura 1.1 - Passos, capítulos e procedimentos utilizados na pesquisa

Os passos da pesquisa realizada são detalhados a seguir:

Passo 1: Pesquisa teórico-conceitual sobre planejamento e controle da produção (PCP), sistemas de coordenação de ordens e trabalhos que relacionam um ou mais SCO em ambientes *flow shop* com uso de simulação. Esse passo teve como objetivos: i) adquirir e/ou aprofundar conhecimento nos temas da pesquisa; ii) aprender a lógica de funcionamento do sistema; e iii) identificar medidas de desempenho que interferem no comportamento dos sistemas. Tal passo é explicitado nos capítulos 2, 3 e 4 da tese.

Passo 2: Simulação, dos SCO selecionados, em um caso real de uma empresa automobilística que possui ambiente de produção *flow shop*. Nesse passo, foi utilizado o procedimento de pesquisa experimental, via simulação computacional. Houve a modelagem e simulação do cenário atual da empresa estudada. Depois de validado o cenário atual, foram feitos os demais cenários considerando as características e particularidades dos SCO selecionados (CONWIP,

kanban e TBC). Nota-se nessa fase, o uso de uma abordagem interdisciplinar entre as áreas de pesquisa operacional (uso de simulação e otimização) e planejamento e controle da produção (foco em sistemas de coordenação de ordens). O passo 2 é explicitado nos capítulos 5 e 6 da tese.

Passo 3: Análise e comparação dos SCO puxados simulados em diversos cenários. Finalizado o passo anterior, foi possível obter os resultados sobre o desempenho de cada sistema segundo a situação real da empresa. A partir disso, houve a análise e comparação dos sistemas em cenários considerando alteração nos coeficientes de variação da demanda, da chegada dos eixos e dos tempos de processamento, presença de gargalo(s) na linha e alteração na variedade de produtos. Com isso, foi elaborado um mapa mental com características que favorecem o uso de determinado SCO. Tal passo é tratado no capítulo 7 da tese.

Passo 4: Verificação das proposições e objetivos. Finalizado o passo 3, houve a corroboração ou refutação da proposição levantada na subseção 1.2 dessa tese e a verificação do cumprimento dos objetivos da pesquisa. Esse passo é discutido no capítulo 8.

Nas subseções 1.3.1, 1.3.2 e 1.3.3 são, respectivamente, discutidos os seguintes aspectos metodológicos: explicação científica, abordagem de pesquisa e métodos (procedimentos) de pesquisa.

1.3.1 Explicação científica

A explicação científica pode ser procedida de forma indutiva, conforme Matallo Jr (2000) e Carvalho (2000) ou dedutiva, segundo Carvalho (2000), sendo que esta última apresenta uma evolução para hipotético-dedutiva (CARVALHO, 2000). Neste trabalho utilizou-se o dedutivismo, mas em sua forma hipotético-dedutiva.

Na concepção hipotético-dedutiva, conforme Carvalho (2000) um fato-problema que requer uma hipótese explicativa é o ponto de partida de toda ciência. Deve ser efetuado um teste da hipótese formulada. Desta hipótese são deduzidas algumas consequências preditivas que são confrontadas com os fatos. A hipótese é refutada, ou falseada, se após esta confrontação das consequências preditivas com os fatos houver a manifestação de que são falsas. Caso elas se apresentem verdadeiras, a hipótese é dada por

corroborada, ou seja, que a hipótese em questão resistiu até então às tentativas de refutação, mas um dia ela poderá ser refutada.

Pode-se inferir que no modelo hipotético-dedutivista há a possibilidade de refutar a hipótese ou de corroborá-la. Portanto, a presente pesquisa caracteriza-se por ser hipotético-dedutiva, pois a partir de um problema construiu-se uma proposição na qual foi verificada para, após isso, ser falseada ou corroborada.

1.3.2 Abordagem de pesquisa

A pesquisa pode ser classificada em abordagem quantitativa ou qualitativa, de acordo com Bryman (1989). Há autores, como Creswell (1994), que defendem o uso combinado da abordagem quantitativa com a qualitativa como estratégia de pesquisa.

Na presente pesquisa foram utilizadas estas abordagens de forma combinada. O objetivo da pesquisa foi alcançado utilizando-se o método de pesquisa experimental, que possui preocupações da abordagem quantitativa, a saber (BRYMAN, 1989): i) as hipóteses contêm conceitos que precisam ser medidos em ordem para as hipóteses serem sistematicamente testadas; ii) demonstração de causalidade, que é a demonstração de como as coisas vêm a ser do modo como elas são; iii) generalização, que é a procura de descobertas que podem ser generalizados além dos limites de uma investigação específica; iv) as investigações devem ser capazes de replicação, que significa a possibilidade de um pesquisador empregar os mesmos procedimentos daqueles usados em outro estudo para checar a validade da investigação inicial.

Assim, a pesquisa quantitativa é impulsionada por várias preocupações anteriores, que derivam de questões teóricas ou de uma leitura da bibliografia em um domínio particular (BRYMAN, 1989).

Na etapa da pesquisa em que foi utilizado o método de pesquisa estudo de caso, foram coletados alguns dados sob essa perspectiva qualitativa, conforme Bryman (1989): i) a postura do pesquisador como um membro da organização, bem informado; ii) a pesquisa apresenta um forte senso de contexto; iii) existe uma ênfase no processo, pois há o desdobramento dos eventos no tempo; iv) a tentativa de aproximação não é estruturada, sem a preocupação da entrada no campo com uma forte pré-orientação teórica e hipóteses formuladas; v) a investigação pode empregar três fontes principais de dados: o campo com uma observação participante, a transcrição de entrevistas e conversas e os documentos; vi) há

uma notável concepção da realidade organizacional; vii) procura da manutenção de uma estreita proximidade com o fenômeno estudado.

1.3.3 Métodos de pesquisa

Conforme Berto e Nakano (1998; 2000), os procedimentos de pesquisa mais utilizados em Engenharia de Produção são: teórico-conceitual, experimental, *survey* (pesquisa de avaliação), pesquisa-ação e estudo de caso. Como pôde ser notado na Figura 1.1, os procedimentos de pesquisa utilizados neste trabalho foram: teórico-conceitual, experimental, e estudo de caso.

1.3.3.1 Pesquisa Teórico-Conceitual

De acordo com Berto e Nakano (1998; 2000), esse tipo de pesquisa é fruto de uma série de reflexões fundamentadas em um fato observado ou exposto pela literatura, reunião de opiniões e ideias de diversos autores ou mesmo pela simulação e modelagem teórica. Os autores, visando à classificação dos trabalhos científicos, propuseram que as observações de campo não estruturadas, as que segundo os mesmos são realizadas sem instrumentos formais de coleta de dados, também sejam classificadas como teórico-conceituais. Conforme esses autores, as discussões conceituais baseadas na literatura e revisões bibliográficas são pesquisas que se encaixam neste grupo.

Neste trabalho foi realizada a pesquisa teórico-conceitual com o intuito de pré-orientação teórica (revisão bibliográfica sobre os SCO), como auxílio na definição dos SCO a serem simulados e, também, para aquisição de informações necessárias para a modelagem destes.

1.3.3.2 Experimental

Este tipo de pesquisa, como descrito por Creswell (1994), tem por finalidade verificar as relações de causa e efeito, de forma que o pesquisador possa manipular as variáveis independentes, verificando as alterações ocorridas nos resultados decorrentes destas manipulações. De acordo com Bryman (1989), este método de pesquisa é mais indicado para abordagens quantitativas. A pesquisa experimental é geralmente relacionada com

experimentos controlados em laboratório e também modelagens matemáticas e simulações computacionais. Este procedimento será utilizado nesta pesquisa devido ao uso de simulação no passo quatro desta pesquisa (vide Figura 1.2).

A simulação é defendida por vários autores como Buffa e Sarin (1987), Law e Kelton (2000), Berends e Romme (1999), Chwif e Medina (2007) e Freitas Filho (2008).

Simulação é um processo de experimentação com um modelo detalhado de um sistema real para determinar como o sistema responderá a mudanças em sua estrutura, ambiente ou condições de contorno (HARREL *et al.*, 1997). Já para Berends e Romme (1999), simulação é definida como a construção de um modelo de processo e a experimentação com a replicação deste processo pela manipulação das variáveis e suas inter-relações dentro do modelo. Abordagem de geração de conhecimento racional com modelos objetivos que explicam o comportamento dos processos operacionais da vida real.

A simulação pode ser realizada com auxílio de computadores. Conforme Law e Kelton (2000), a simulação computacional é constituída por técnicas que usam computadores para “imitar” ou simular diversos tipos de operações ou processos do mundo real.

Há dois tipos de simulação: i) física, e ii) matemática. A simulação matemática pode ser feita de modo analítico ou numérico (determinístico ou estocástico). É possível, também, classificar a pesquisa fundamentada no modelo de gestão de produção e operações em duas classes distintas: i) axiomática, e ii) empírica. Ademais, esses tipos de pesquisas podem ser: descritivo ou normativo (BERENDS; ROMME, 1999).

Ultimamente, a simulação tem sido usada em uma ampla variedade de aplicações em produção e operações que variam de programação de linha de montagem até projeto de fábrica. Autores da área listam alguns tipos particulares de problemas em que a simulação tem se mostrado uma ferramenta útil e poderosa, tais como: i) projetar e analisar sistemas de produção; ii) avaliar requisitos de hardware e software para um sistema de computador; iii) avaliar sistemas de armas ou táticas militares; iv) determinar políticas de ordenação para um sistema de inventário; v) projetar sistemas de comunicação e seus protocolos de redes; vi) projeto e exploração de instalações, tais como rodovias, aeroportos, metrô ou portos; vii) avaliar projetos para organizações de serviço, como hospitais, correios, ou restaurantes *fast-food*; viii) análise de sistemas econômicos e financeiros. Os diversos usos de simulação podem ser agrupados em três grandes categorias (BUFFA; SARIN, 1987): i) projeto, ii) diagnóstico, e iii) treinamento.

Apesar das numerosas vantagens da simulação enumeradas por Freitas Filho (2008), como a facilidade de aplicação comparada com os métodos analíticos, e possibilidade

de identificação de “gargalos”, as empresas devem tomar cuidado com as armadilhas que podem causar o insucesso em seus projetos. Autores como Law e Kelton (2000), Ulgen *et al.* (1996) e Freitas Filho (2008) abordam tais preocupações.

Algumas dessas armadilhas são (LAW; KELTON, 2000, p. 116): i) falha na definição do conjunto de objetivos no início do estudo de simulação; ii) Inadequado nível de detalhamento do modelo; iii) falhas de comunicação com os gestores durante o estudo; iv) tratar o estudo de simulação principalmente como um exercício de utilização de *software* em computador; v) não incluir na equipe de modelagem pessoas com conhecimento de estatística e pesquisa operacional; vi) adotar *software* de simulação inadequado, que não permita implementar a lógica desejada e que contenha erros; vii) confiar que os simuladores tornam a simulação acessível a todos; viii) não considerar corretamente as fontes de aleatoriedade no sistema atual; ix) mau uso da animação; x) uso arbitrário de distribuições de probabilidade como dados de entrada; xi) analisar os resultados a partir de uma rodada usando fórmulas estatísticas; xii) fazer uma única replicação de um modelo de simulação e tomar os resultados obtidos como “a verdadeira resposta”; xiii) comparar modelos alternativos do sistema com uma única replicação em cada modelo; xiv) uso de medidas de desempenho erradas.

Para conduzir um estudo de simulação, vários autores sugerem um conjunto de passos. Dentre esses autores estão: Emshoff e Sisson (1970), Shannon (1975), Ingels (1985), Pedgen *et al.* (1990), Scriber (1991), Law e Kelton (2000), Banks *et al.* (1996) e Chwif e Medina (2007). Nesse trabalho convencionou-se o uso dos passos propostos por Law e Kelton (2000) devido à similaridade entre os passos sugeridos por esses autores.

As etapas propostas por Law e Kelton (2000) estão representadas na Figura 1.3 e são expostas a seguir:

Etapa 1) Formulação do problema e planejamento do estudo: todo estudo de simulação computacional inicia-se com essa primeira etapa. Dentre as informações contidas aqui estão a definição do tempo requerido para finalizar cada etapa do projeto de simulação, identificação das pessoas envolvidas, geração de hipóteses, custos, entre outros.

Etapa 2) Coleta de dados e definição do modelo: o sistema é abstraído por meio de um modelo conceitual e os dados relacionados ao sistema são coletados. Um modelo deve conter somente os detalhes necessários para capturar a essência do sistema e atender aos seus propósitos. Um modelo com detalhes excessivos pode ser muito caro para programar e para executar.

Etapa 3) Validação do modelo: nessa etapa, o modelo conceitual elaborado é percorrido de modo estruturado, verificando se todas as suposições são atendidas. Somente após essa

validação, passa-se para a próxima etapa. Ressalta-se que na construção do modelo é imperativo envolver pessoas no estudo que sejam intimamente familiares com as operações do sistema atual. Além disso, é aconselhável interagir com tomadores de decisão ou pretendentes usuários do modelo. Isto aumentará a validade atual do modelo e a credibilidade (ou validade percebida). Também, a adequabilidade das distribuições de probabilidade especificadas para representar as entradas que possuem aleatoriedade envolvida, deve ser testada por meio de usos de testes de aderência.

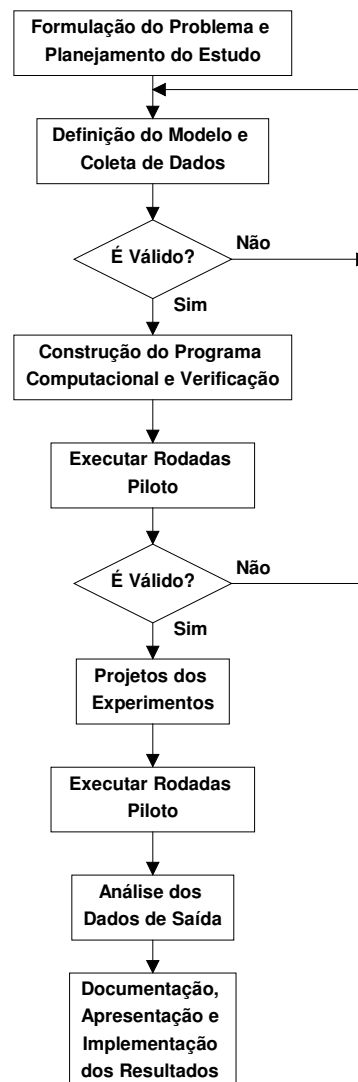


Figura 1.3 – Etapas de um estudo de simulação

Fonte: Adaptado de Law e Kelton (2000)

Etapa 4) Construção do programa computacional e verificação: há a programação do modelo no software de simulação computacional ou por meio do uso de linguagens de propósito

geral. Depois que a modelagem foi feita no software, é realizada a verificação do funcionamento e adequação do programa comparando-se ao modelo conceitual determinado.

Etapa 5) Realização de execuções piloto: são feitas algumas execuções piloto para validação. Assim, há a realização de uma simulação (execução do programa) com os mesmos parâmetros (distribuição de probabilidade de entrada, número de servidores, entre outros), considerando que uma simulação é composta de diversas execuções.

Etapa 6) Validação do modelo programado: nessa etapa há a determinação de que o modelo é uma representação confiável do sistema analisado. Execuções piloto podem ser usadas para testar a sensibilidade das saídas do modelo quanto a pequenas mudanças em um parâmetro de entrada. A validação pode ser efetuada por meio de comparação e calibração do modelo frente ao comportamento real do sistema em estudo.

Etapa 7) Projeto dos experimentos: deve ser decidido quais projetos de sistemas simular. Na prática, algumas vezes existem mais alternativas do que alguém poderia simular e a decisão completa não poderia ser feita em tempo. Também, são determinados nesta etapa o número, a duração, as configurações e as condições iniciais da simulação.

Etapa 8) Realização das execuções de simulação: várias simulações e execuções são feitas para que os resultados e medidas de desempenho sejam empregados na validação.

Etapa 9) Análise de resultados: técnicas estatísticas são usadas para analisar os dados de saída de uma execução realizada. Durante a análise dos dados de saída é determinado o desempenho absoluto de certas configurações do sistema e a comparação de configurações alternativas em termos relativos.

Etapa 10) Documentação, apresentação e implementação dos resultados: nessa etapa é realizada a documentação de forma adequada para auxiliar o entendimento do estudo realizado, dar credibilidade aos resultados do processo e facilitar modificações. Considera-se falha a não implementação dos resultados de um estudo de simulação que possui modelo de alta credibilidade.

Neste trabalho foi utilizada a simulação do tipo matemática realizada de forma numérica e estocástica, por meio do software de simulação computacional Arena[®] e seguindo as etapas propostas por Law e Kelton (2000). Tal software foi selecionado devido à sua credibilidade na área de simulação computacional e pela possibilidade de liberação temporária de uma licença do laboratório de informática do Departamento de Engenharia de Produção da UFSCar para uso no computador pessoal.

Para a coleta de dados para a construção do modelo, foram realizadas cinco reuniões e uma visita de campo. A visita durou um período de quatro horas e possuía o intuito

de ambientação com o objeto de estudo. Nesta conheceu-se globalmente todas as linhas de produção e alguns processos realizados no chão de fábrica e detalharam-se os processos da linha de eixos traseiros, que consistiu a linha liberada pela empresa para a realização da modelagem e simulação. A visita foi realizada em período normal de expediente.

Quanto às reuniões para aquisição dos demais dados e informações necessárias para a modelagem, estas foram realizadas em período fora do expediente normal da empresa e fora de suas instalações, devido a uma política de segurança da informação praticada pela empresa na época de realização desta fase da pesquisa, que não permitia a permanência de pessoas externas à organização por longos períodos de tempo e para coletas de dados no chão de fábrica. Alguns aspectos práticos sobre os dados coletados para a modelagem são discutidos no Capítulo 5.

Quanto às análises realizadas para os modelos desenvolvidos, foram seguidos principalmente os preceitos de Walpole *et al.* (2009), Freitas Filho (2008), Chwif e Medina (2007), Kelton, Sadowski e Sadowski (2007), Prado (2004), Law e Kelton (2000) e Spiegel (1993), os quais foram detalhados nos capítulos 5, 6 e 7.

1.3.3.3 Estudo de Caso

O estudo de caso é um método de pesquisa definido como uma forma de se fazer pesquisa social empírica ao investigar um fenômeno atual dentro de seu contexto de vida real, em que as fronteiras entre o fenômeno e o contexto não são claramente definidas e na situação em que múltiplas fontes de evidência são usadas (YIN, 1990).

De acordo com Leonard-Barton (1994) *apud* Voss *et al.* (2002), um estudo de caso é uma história de um fenômeno passado ou corrente, delineado a múltiplas fontes de evidência. Pode incluir dados de observação direta e entrevista sistemática tão bem como dados de arquivos públicos e privados. Algum fato relevante para o fluxo de eventos que descrevem o fenômeno é um dado potencial em um estudo de caso, até o contexto é importante.

Conforme Yin (1994), uma pesquisa do tipo estudo de caso pode incluir tanto um único estudo de caso quanto um estudo multicase. Além disso, um estudo de caso pode conter, e igualmente ser limitado a evidências quantitativas. Portanto, a estratégia estudo de caso não deve ser confundida com uma pesquisa qualitativa.

Existem três fortes pontos da pesquisa de caso conforme Meredith (1998) *apud* Voss *et al.* (2002): i) o fenômeno pode ser estudado em seu ambiente natural e significativo;

ii) o método de caso permite as questões por que, o que e como, serem respondidas com um entendimento relativamente completo da natureza e complexidade do fenômeno completo; iii) o método de caso fornece a si uma rápida investigação exploratória onde as variáveis ainda não são conhecidas e o fenômeno não é todo entendido.

Na presente pesquisa foi realizado um estudo de caso em uma empresa automobilística atuante no mercado brasileiro, selecionada por amostragem não probabilística e intencional. A amostragem foi assim procedida devido à necessidade de acesso a dados e informações referentes a uma parte da linha de produção *flow shop*.

Assim, o estudo de caso foi utilizado como procedimento para compreender o sistema estudado e coleta de dados e informações necessárias para a elaboração dos modelos no simulador utilizado. Os envolvidos da empresa, nessa fase da pesquisa, foram três funcionários pertencentes às áreas de engenharia de processo e engenharia industrial.

1.4 Justificativa da importância do tema

Dentre as quatro funções administrativas está o controle. A função controle verifica se o que foi planejado e organizado foi/está sendo, de fato, realizado (CHIAVENATO, 2006). Steiner (1979) afirma que o controle envolve responsabilidades além do processo de avaliação de desempenho. Consiste, também, na tomada de ações corretivas à medida que são encontradas divergências em relação ao planejado.

A função controle aplicada às práticas produtivas denomina-se controle da produção, no qual, de acordo com Pires (1995), consiste no acompanhamento da fabricação e compra dos itens planejados/programados, com o intuito de cumprimento dos prazos. Além disso, costuma atuar na coleta de dados relevantes para o sistema de custos, na tomada de decisões peculiares ao chão de fábrica e na alimentação de informações ao controle de estoques.

Os Sistemas de Coordenação de Ordens (SCO) estão inseridos no contexto do controle da produção. Estes sistemas, muitas vezes denominados de *Ordering Systems*, de Sistemas de Controle da Produção, de Sistemas de Planejamento e Controle da Produção (PCP) e até de Métodos de PCP, envolvem algumas ou todas as seguintes atividades (FERNANDES; GODINHO FILHO, 2007): i) Programar ou Organizar/Explodir as necessidades em termos de componentes e materiais; ii) Controlar a emissão/liberação das

ordens de produção e compra, determinando se e quando liberar as ordens; iii) Programar/Sequenciar as tarefas nas máquinas. Nessa tese será usado o termo SCO.

Fernandes e Godinho Filho (2007, p. 339) alocam os SCO em quatro grupos: a) Sistemas de pedido controlado; b) Sistemas controlados pelo nível de estoque (CNE); c) Sistemas de fluxo programado; e d) Sistemas híbridos, nos quais possuem características dos sistemas das classes 'b' e 'c'.

Gershwin (2000) também apresenta uma classificação dos sistemas de controle da produção, utilizada também por González-R e Framinan (2009). Tal classificação é baseada no mecanismo de disparo do material na linha de produção, a saber:

- i) Sistemas baseados em sinal: um trabalho pode ser processado em certa estação de trabalho de acordo com a existência de sinais (geralmente cartões) no respectivo painel de controle.
- ii) Sistemas baseados em tempo: a entrada de trabalho em uma estação de trabalho é disparada por um intervalo de tempo fixo.
- iii) Sistemas baseados em excedentes: a entrada de trabalho em uma estação de trabalho é feita de acordo com a diferença entre a demanda cumulativa e a produção agregada.

Os SCO possuem certo grau de complexidade e diversas variáveis a serem consideradas durante a seleção do sistema mais adequado a realidade de um sistema produtivo. Portanto, o tema da presente pesquisa justifica-se pela importância dos SCO nas rotinas de PCP e pela possibilidade de desenvolvimento de um método que identifique o melhor SCO para determinada organização, aprimorando, assim, as práticas gerenciais.

Vale salientar, também, a importância do ambiente de produção *flow shop*. *Flow shop*, conforme Gomes (2002), é um sistema projetado de forma que os processos de trabalho e os equipamentos são organizados conforme as etapas progressivas pelas quais o produto é produzido, ou seja, a disposição é linear.

Putnam (1983) *apud* Fernandes e Godinho Filho (2010) resume as diferenças entre os sistemas *flowshop* e *jobshop*, que são especificadas no Quadro 1.1. Percebe-se que, dentre as diferenças básicas, o *flowshop* atua em um fluxo de peças/materiais e os equipamentos são de uso dedicado. Já, o *jobshop* opera em lotes e os equipamentos são de uso geral.

As aplicações deste tipo de ambiente estão na fabricação e montagem de produtos (linha de montagem), sendo adequado à fabricação de produtos padronizados, como por exemplo, eletrodomésticos, automóveis, produtos têxteis, calçados, equipamentos eletrônicos, entre outros, e na prestação de serviços, como em restaurantes *self-service*, e na editoração de revistas e jornais (GOMES, 2002).

Quadro 1.1 – Diferenças básicas entre os sistemas *flowshop* e *jobshop*

<i>Flowshop</i>	<i>Jobshop</i>
Opera em um fluxo de materiais e peças.	Opera em lotes.
Varia a produção alterando a taxa de produção.	Varia a produção variando o tamanho dos lotes ou a frequência dos lotes.
Tende a ter custos menores de <i>set-up</i> .	Tende a ter custos maiores de <i>set-up</i> .
As operações de tipos diferentes são sequenciadas de modo que o fluxo seja mantido. Filas são pequenas e variações têm que ser acompanhadas.	Materiais são trazidos para os departamentos ou centros de trabalho onde cada operação é realizada. Filas nos centros de trabalho são maiores.
Utilização de equipamentos de uso especializado (dedicado).	Utilização de equipamentos de uso geral.

Fonte: Putnam (1983) *apud* Fernandes e Godinho Filho (2010)

De acordo com Tubino (1999), os motivos que justificam a escolha de tal ambiente de produção estão relacionados, de forma direta, à possibilidade de montar uma estrutura produtiva com alta especialização e pouca flexibilidade, onde os investimentos efetuados podem ser amortizados em um longo prazo. As demais vantagens e desvantagens da utilização do *flow shop* estão apontadas no Quadro 1.2.

Quadro 1.2 – Demais vantagens e desvantagens

<i>Flow shop</i>	
Vantagens	Desvantagens
Controle de produção simplificado (fluxo de produtos e informações é muito claro e previsível).	Baixa flexibilidade (especialização do equipamento de produção, com nenhuma/pouca possibilidade de adaptações para produção de componentes diferentes).
Facilidade em balancear a linha (estes sistemas utilizam a linha de acionamento contínuo).	Utilização de estoques amortecedores (<i>buffers</i>) (componentes para suprir o processo), o que aumenta o <i>work in process</i> (WIP).
Tempo total de produção pequeno (proximidade das máquinas e rapidez em realizar tarefas que integram cada produto).	Alto custo de quebra de máquina e falhas de equipamento da linha (podem produzir grandes prejuízos, pois há grande interdependência).
Supervisão e mão-de-obra não especializada e com um mínimo de investimento em treinamento.	Papel limitado do operário (realiza repetidamente uma pequena variedade de atividades em alguns projetos de produto).

Fonte: Adaptado de Tubino (1999)

Davis et al. (2001) afirmam que este ambiente vem sofrendo modificações em empresas que se estruturam de acordo com os princípios modernos de produção visando adequá-lo ao sistema flexível de produção. Dentre essas adequações estão a maior variabilidade nas estações de trabalho, treinamentos e utilização de ferramentas para gerar produção de alta qualidade e agregar maior flexibilidade ao número de produtos manufaturados na linha.

Destaca-se, também, a importância de se realizar pesquisas em empresas do setor automobilístico, devido à representatividade na economia brasileira. Segundo

FENABRAVE (2011), o setor automobilístico obteve um novo recorde de vendas em 2010. O total de veículos emplacados somou 5.444.387 unidades, comparado com as 4.842.736 unidades de 2009, o que representa uma alta de 12,42%. Além disso, o crescimento foi ainda maior entre novembro e dezembro – aumento de 498.233 unidades para 593.013 unidades – alcançando 19,02%.

1.5 Estrutura do trabalho

Essa tese foi estruturada em oito capítulos, os quais são apontados a seguir:

- Capítulo 1 – Introdução: nesta parte é realizada a apresentação do trabalho; objetivos, questões e proposição; metodologia de pesquisa; justificativa da importância do tema; e estrutura do trabalho.
- Capítulo 2 – Planejamento e Controle da Produção (PCP): são apresentados nessa parte os conceitos pertinentes ao PCP. A principal contribuição desse capítulo é a contextualização dos sistemas de coordenação de ordens perante as atividades de planejamento e controle da produção.
- Capítulo 3 – Sistemas de Coordenação de Ordens (SCO): neste capítulo são apresentados conceitos sobre SCO e alguns SCO discutidos quanto as suas particularidades, vantagens e desvantagens. Além disso, há a exposição do modo de funcionamento desses sistemas. A principal contribuição dessa parte é a obtenção e/ou aprofundamento de conhecimento sobre SCO.
- Capítulo 4 – Trabalhos que relacionam um ou mais SCO em ambientes *flow shop* com uso de simulação: é apresentada nessa parte uma vasta revisão de literatura, na qual houve a preocupação de identificar os trabalhos que comparam sistemas de coordenação de ordens por meio de simulação de ambientes *flow shop*. A principal contribuição deste capítulo é a exposição, de forma organizada, das principais informações contidas nesses trabalhos analisados, como sistemas analisados, medidas de desempenho utilizadas, principais resultados adquiridos, entre outras.
- Capítulo 5 – Modelagem e simulação do cenário atual da linha de eixos traseiros: são expostos e discutidos os passos considerados para o estudo de simulação do cenário atual da linha de eixos traseiros. As contribuições deste capítulo consistem na elaboração da base para a simulação dos SCO selecionados e na aquisição de maior conhecimento sobre o sistema real da empresa (sistema empurrado).

- Capítulo 6 – Simulação dos SCO em um ambiente real de produção *flow shop*: nessa parte há a exposição da simulação computacional dos SCO selecionados, realizada com base em um caso real efetuado em uma empresa automobilística. A maior contribuição desse capítulo é a demonstração dos resultados obtidos para dar subsídio à discussão realizada no capítulo 7 e a possibilidade da empresa utilizar os modelos elaborados para visualizar os possíveis impactos gerados na linha com uso de dado SCO.
- Capítulo 7 – Análise dos sistemas puxados simulados na empresa automobilística. No presente capítulo, o foco da análise está nos sistemas CONWIP, *kanban* e TBC. Foram realizadas simulações de cenários com alterações nos coeficientes de variação da demanda, da chegada dos eixos no início da linha e do tempo de processamento, presença de gargalos na linha e alteração na variedade de produtos. No decorrer da discussão dos resultados obtidos nesse capítulo, efetuaram-se comparações de resultados de trabalhos apresentados no Capítulo 4. A principal contribuição dessa parte é a apresentação de informações importantes sobre o desempenho de sistemas de coordenação de ordens puxados. Também, apresenta uma abordagem de análise e comparação de sistemas que pode ser seguida pelas empresas durante a decisão de qual sistema puxado adotar.
- Capítulo 8 – Considerações finais: neste capítulo são assinaladas as conclusões do trabalho. Há a apresentação de considerações gerais, avaliação dos objetivos e da proposição, comparação da tese com trabalhos que compararam os mesmos sistemas por meio de simulação, exposição das contribuições do trabalho e propostas de pesquisas futuras.

CAPÍTULO 2 – PLANEJAMENTO E CONTROLE DA PRODUÇÃO (PCP)

2.1 Considerações Iniciais

O objetivo do presente capítulo é apresentar conceitos pertinentes ao planejamento e controle da produção. Utilizou-se o procedimento teórico-conceitual para conduzir essa etapa da tese. Assim, os objetivos específicos foram: i) verificar a existência de definições comuns para o PCP; ii) identificar as atividades de PCP e seus devidos horizontes de tempo; iii) explicitar relacionamentos das atividades de PCP com outras áreas empresariais e sistemas.

A estrutura do capítulo, para cumprir os objetivos, é a que segue: na próxima seção são apresentadas e discutidas diversas definições de PCP presentes em bibliografias da área; na seção 2.3 os horizontes de tempo para realização das atividades de PCP (longo, médio e curto prazos) são delimitados; na seção 2.4 as atividades de planejamento e de controle da produção são especificadas; na seção 2.5 há a exposição de possíveis integrações entre as atividades de PCP com demais áreas (engenharia, marketing etc.) e sistemas (MRP II, ERP etc.); na última seção estão as conclusões.

2.2 Definições de PCP

O PCP é denominado por Zacarelli (1979) como Programação e Controle da Produção, e definido como a reunião de funções inter-relacionadas que possuem o objetivo de comandar o processo produtivo e coordená-lo com os demais setores administrativos da empresa. Nessa definição, o autor foca nas funções administrativas comando e coordenação, segundo as funções administrativas de Fayol (prever, organizar, comandar, coordenar e controlar) abordadas por Chiavenato (2003).

Burbridge (1988) foca o objetivo em uma abordagem baseada em recursos, métodos e metas, ao expor que o intuito do PCP é propiciar um uso adequado dos recursos, de modo que os produtos específicos sejam produzidos por métodos específicos, para atender um plano de vendas aprovado.

Sipper e Bulfin Jr. (1997) adotam uma abordagem sistêmica, afirmando que PCP é um sistema integrado baseado em fluxo de material e informação. Então, a essência do

PCP consiste em gerenciar os ‘desvios’ enquanto mantém as metas consistentes com aquelas da organização. Portanto, o objetivo é a otimização do sistema, ao invés de otimização de um único elemento.

Vollmann *et al.* (2006) elaboraram uma definição baseada na gestão da cadeia de suprimentos, especificando que a essência do sistema de PCP é a gerência eficiente do fluxo de material, da utilização de equipamentos e pessoas em busca da resposta às necessidades de clientes. Para tanto, utiliza-se a capacidade dos fornecedores e da estrutura interna para atender à demanda, podendo ser usada também, em alguns casos, a capacidade dos clientes para o cumprimento da demanda.

Tubino (2007) acrescenta uma visão hierárquica e departamental/setorial ao conceito de PCP. O autor explicita que, para atender da melhor forma possível aos planos determinados nos níveis estratégico, tático e operacional, o PCP, enquanto departamento ou setor de apoio à produção, se responsabiliza pela aplicação e coordenação dos recursos produtivos.

Fernandes e Godinho Filho (2010) expandem a definição englobando um *checklist* de atividades similar à ferramenta gerencial 5W3H (*What* – o que será feito; *Why* – por que deve ser feita a atividade; *Where* – onde será executada; *When* – quando; *Who* – quem realizará; *How* – como deverá ser feita; *How much* – quanto vai custar e *How measure* – como medir/avaliar). Assim, os autores afirmam que as atividades de PCP abrangem decisões que objetivam a definição do que, quanto e quando produzir, comprar e entregar, preocupando também com quem e/ou como produzir.

2.3 Horizontes de tempo versus PCP

As atividades que apoiam o sistema de PCP podem ser categorizadas de acordo com seu o horizonte de tempo. Segundo Vollmann *et al.* (2006), os horizontes de tempo são: longo, médio e curto prazo. Silver e Peterson (1985) e Tubino (2007) relacionam o horizonte de tempo com os três níveis hierárquicos: nível estratégico (longo prazo), nível tático (médio prazo) e nível operacional (curto prazo).

Tubino (2007) explicita que, normalmente, o longo prazo refere-se a atividades desempenhadas em meses ou trimestres com alcance de anos. Já o médio prazo diz respeito às atividades realizadas em semanas com a abrangência de meses à frente. O curto prazo abrange

atividades diárias, para a semana em andamento. No entanto, ressalta-se que os horizontes de prazos podem variar de acordo com a característica do sistema produtivo.

As principais atividades de PCP relacionadas com o horizonte de tempo são explicitadas a seguir:

- i) Longo prazo (nível estratégico): fornecer informações que auxiliam a tomada de decisões sobre a quantidade adequada de capacidade (incluindo prédios, equipamento, fornecedores etc.) para atender as demandas futuras do mercado; fornecer o conjunto apropriado de capacidade de recursos humanos, tecnologia e localizações geográficas para atender às necessidades futuras da empresa (VOLLMANN *et al.*, 2006).
- ii) Médio prazo (nível tático): planejar as quantidades corretas de material para chegar no tempo e no lugar corretos para sustentar a produção e a distribuição de produtos; manter níveis adequados de estoques de matérias-primas, material em processo e produtos acabados nos lugares certos para atender às demandas do mercado; determinar possibilidades de horas extras, o nível de emprego, necessidades de suporte, necessidades de subcontratação etc. (VOLLMANN *et al.*, 2006). Tubino (2007) enfatiza que o sistema produtivo planejará o uso da capacidade instalada para atender às previsões de vendas de médio prazo e/ou os pedidos em carteira firmados com os clientes.
- iii) Curto prazo (nível operacional): executar a produção com base na programação de recursos, como tempo, pessoas, materiais, equipamentos e instalações (VOLLMANN *et al.*, 2006). Além disso, devem-se entregar os bens e/ou serviços aos clientes (TUBINO, 2007).

O horizonte de tempo para as atividades de planejamento é discutido também em Sipper e Bulfin Jr (1997) e Corrêa, Giansi e Caon (2001). Fernandes e Godinho Filho (2010) discutem os níveis de planejamento/programação da produção segundo o horizonte usual.

2.4 Atividades de PCP

Zacarelli (1979) afirma que dificilmente se encontra, na prática, dois sistemas de Planejamento e Controle da Produção iguais. Os principais fatores responsáveis por esta diferenciação são: tipo de indústria, tamanho da empresa e diferenças entre estruturas administrativas.

As atividades mais facilmente encontradas em um PCP são a previsão de demanda, planejamento de recursos de longo prazo, planejamento agregado de produção,

planejamento mestre da produção, planejamento de materiais, planejamento e controle da capacidade, programação e sequenciamento da produção e controle da produção e materiais (PLOSSL,1985).

Uma abordagem bastante usual nos trabalhos sobre as atividades básicas de PCP consiste em tratá-las isoladamente sob uma visão hierárquica. Segundo Pires (1995), o primeiro nível (planejamento) é composto pelas atividades de PCP, respectivamente, carteira de pedidos e/ou previsão de vendas, planejamento agregado da produção, programa mestre da produção e planejamento das necessidades de materiais. O segundo nível (programação) é composto pelas atividades paralelas: programação da produção e planejamento e controle da capacidade. O terceiro e último nível (controle), é composto pelas atividades controle da produção e controle dos estoques.

De acordo com Hopeman (1971), as atividades envolvidas no PCP são determinação da matéria-prima necessária, controle de estoque de materiais e partes, formulação dos roteiros que mostram a sequência de operações para manufatura (processos), formulação de programas que determinam quando devem começar e terminar determinados trabalhos. Já conforme com Russomano (1995), as atividades do PCP abrangem o planejamento de vendas, definição do roteiro da produção, planejamento e controle de estoques, emissão de ordens, programação das ordens e acompanhamento da produção.

Nesta tese é adotada a visão de Fernandes e Godinho Filho (2010), na qual as principais atividades de PCP são expostas na Figura 2.1. Nota-se que o planejamento agregado da produção necessita de informações da gestão de demanda de médio prazo, da gestão financeira de médio prazo (que é *input* importante para o PCP, mas não é uma atividade de PCP) e do planejamento da capacidade de médio prazo. Este último troca informações constantemente com o planejamento agregado da produção e também é necessário para a determinação da capacidade instalada.

O plano desagregado da produção precisa das informações do planejamento agregado para ser realizado e após pronto emite informações para o controle de suprimento de itens com *leadtime* de suprimento longo.

Outra atividade importante de PCP é o controle da produção. Grosso modo, para esta atividade ser efetuada são necessárias informações da capacidade instalada e do plano desagregado ou da previsão de demanda de curto prazo (em caso *make to stock* – produzir para estoque com base em previsão da demanda). Também, necessita da carteira de pedidos (em casos *make to order* – produzir sob encomenda, *resource to order* –

recursos/insumos sob encomenda, e *engineering to order* – projeto sob encomenda), da estrutura de produtos e roteiros de fabricação.

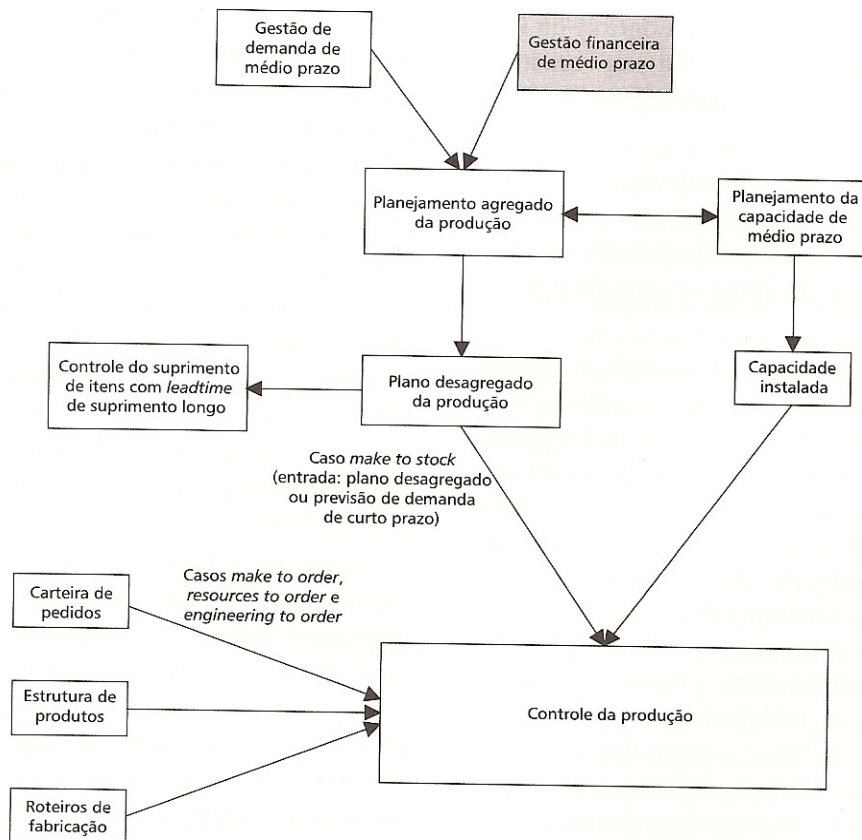


Figura 2.1 – Estrutura do PCP

Fonte: Fernandes e Godinho Filho (2010, p. 09)

Na Figura 2.2 há o detalhamento das atividades de controle da produção, conforme Fernandes e Godinho Filho (2010). Os sistemas de coordenação de ordens, foco desta tese, estão inseridos no contexto do controle de produção.

Assim, para que a controle seja feito, há a entrada de informações sobre a carteira de pedidos, previsão de demanda de curto prazo, plano desagregado da produção, lista de materiais, roteiros de fabricação, entre outras. De posse dessas informações, há a programação da produção em termos de itens finais, programação ou organização/explosão das necessidades em termos de componentes, controle da emissão/liberação de ordens, programação/sequenciamento das tarefas nas máquinas e análises de capacidade de curto prazo.

Executa-se, então, um acompanhamento dos níveis de produção e estoques. Caso o realizado seja igual ao programado ou esperado, há uma nova programação somente para o próximo período ou mantêm-se as regras de controle. Caso haja divergência ou quando aparecem ordens urgentes e inesperadas, são feitas ações reativas a situação indesejada,

reprogramações, tomadas de decisões quanto a imprevistos e/ou más programações/ execuções, tudo isso a partir das informações realimentadas no sistema.

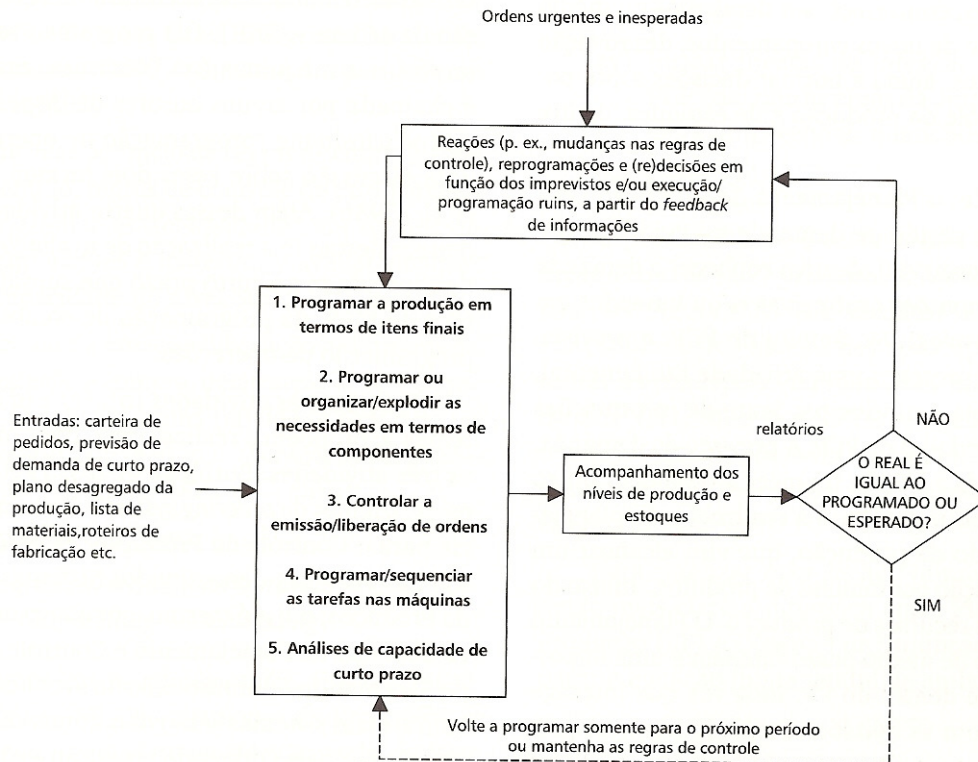


Figura 2.2 – Estrutura do controle da produção
Fonte: Fernandes e Godinho Filho (2010, p. 09)

2.5 Relacionamento das atividades de PCP com as demais áreas e sistemas

As atividades de Planejamento e Controle da Produção podem ser implementadas e operacionalizadas com o auxílio de sistemas abordados pelos autores Silver e Peterson (1985), Corrêa e Gianesi (1993), Goldratt e Fox (1993), Corrêa, Gianesi e Caon (2001), entre outros, a saber: MRP (*Material Requirements Planning* - Planejamento das necessidades de materiais)/MRP II (*Manufacturing Resources Planning* - Planejamento dos Recursos da Manufatura), JIT (*Just in Time* – ‘Justo a tempo’), OPT (*Optimized Production Technology* - Tecnologia de Produção Otimizada), ERP (*Enterprise Resource Planning* – Planejamento dos Recursos do Empreendimento).

Sipper e Bulfin Jr (1997) destacam que as novas tendências no projeto de sistemas de manufatura são os sistemas integrados de manufatura, que podem ser alcançados por meio de três abordagens: manufatura celular, manufatura flexível e manufatura integrada

por computador. Esses sistemas podem apoiar a obtenção de integração entre as atividades do PCP. O PCP integrado caracteriza-se por ter um conceito amplo com uma filosofia essencial que a impulsiona e com um conjunto de ferramentas para implementá-lo (a maioria destas ferramentas é baseada em computador).

Para integrar o PCP existem as abordagens de sistemas empurrados (conforme Slack et al. (2002), nesses sistemas, os centros de trabalho empurram o trabalho para os centros posteriores, desconsiderando a possibilidade de uso), sistemas puxados (segundo Slack et al. (2002), a estação de trabalho consumidora dá a partida na movimentação do trabalho do centro de trabalho antecedente, de acordo com as necessidades de uso) e sistemas baseados em gargalos (SIPPER; BULFIN JR, 1997). O precursor dos sistemas empurrados é a ferramenta MRP (*material requirements planning* - planejamento das necessidades de materiais), que posteriormente evoluiu para MRP II (*manufacturing resource planning* – planejamento dos recursos de manufatura). No MRP, segundo Corrêa e Giansi (1993), a ideia é calcular as necessidades de itens de demanda dependente (componentes e materiais) partindo das necessidades de produtos finais e das estruturas de produtos. Já o MRP II comporta a avaliação das consequências da futura demanda nas áreas financeira, de engenharia e quanto à necessidade de materiais (SLACK et al., 2002). A geração posterior ao MRP II (*manufacturing resource planning* – planejamento dos recursos de manufatura), o ERP (*enterprise resource planning* – planejamento de recurso do empreendimento) também favorece a integração entre todas as atividades do PCP como o MRPII.

O pioneiro dos sistemas puxados, segundo Sipper e Bulfin Jr (1997), foi o sistema *kanban* (palavra japonesa que significa cartão) que é um método de operacionalizar este tipo de sistema de planejamento e controle conforme a filosofia JIT (SLACK et al., 2002). Outra abordagem para sistemas puxados é o CONWIP (*constant work in process*), introduzido por Spearman et al. (1990), que também utiliza cartões para seu funcionamento. No entanto, os cartões estão associados com todas as partes produzidas em uma linha, ao contrário do *kanban* que é associado a partes individuais (SPEARMAN; ZANZANIS, 1992). Tanto o *kanban* quanto o CONWIP colaboram para a integração entre as atividades do PCP coordenação de ordens e *scheduling*.

Quanto aos sistemas baseados em gargalos (restrição de capacidade), de acordo com Sipper e Bulfin Jr (1997), o OPT (*optimized production technology*) originou estes tipos de sistemas. Utiliza a terminologia do tambor (centro de produção gargalo)-pulmão (estoques de proteção)-corda (programação de setores não gargalos) para explicar sua abordagem de produção (SLACK et al., 2002). O OPT desaperda a atenção para uma abordagem racional e

direcionada das atividades de PCP (PIRES, 1995). Em um *survey* realizado por Fry et al. (1992), foi evidenciado que o OPT é mais utilizado por empresas com uma orientação para o mercado *make-to-order*. Favorece a integração entre as atividades: coordenação de ordens, *scheduling*, programa mestre e planejamento da capacidade.

Vollmann *et al.* (2006) explicitam o relacionamento das atividades de PCP com demais sistemas, dentre eles o ERP, como pode ser visto na Figura 2.3. Observa-se que a figura é dividida em três partes: *front end*, *engine* e *back end*. O conjunto de atividades e sistemas para ajuste geral de direção, no qual estabelece a direção geral da empresa para o PCP, é especificado na parte superior (*front end*). No *engine* há o conjunto de sistemas de PCP para planejamento detalhado de capacidade e materiais e na parte inferior da figura (*back end*) apresenta a execução de sistemas de PCP. Nota-se, também que o sistema de PCP representado constitui as partes essenciais de qualquer pacote de sistema ERP.

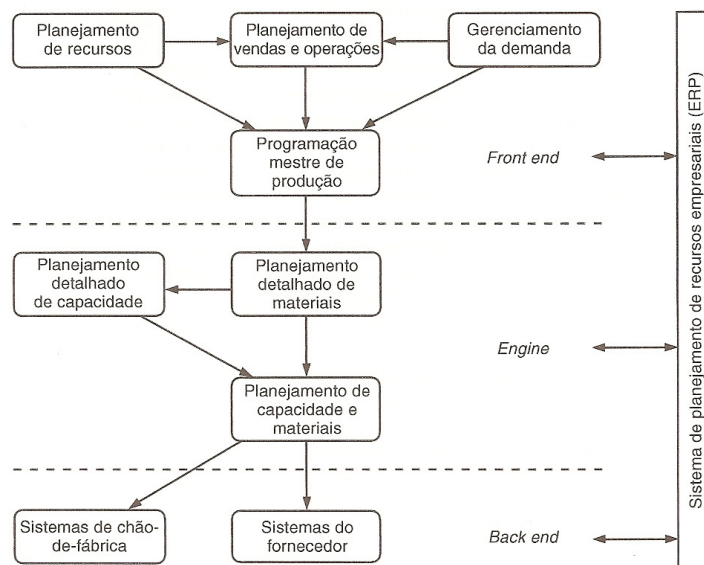


Figura 2.3 – Simplificação do sistema de PCP
Fonte: Vollmann et al. (2006, p. 32)

Tubino (2007) apresenta o relacionamento do PCP com as demais áreas empresariais, no que tange ao fluxo de informações. Na Figura 2.4 mostra-se que as atividades de PCP recebem informações da área de marketing quanto à previsão de vendas para elaboração do planejamento estratégico da produção e planejamento-mestre da produção. Também, o marketing emite os pedidos em carteira para a elaboração do planejamento-mestre da produção (estabelecimento do plano-mestre de produção – PMP). Para o PMP também são necessárias informações emitidas pela área de engenharia, como a estrutura do produto e o

roteiro de fabricação. Essas informações emitidas pela engenharia também são fundamentais para a programação da produção.

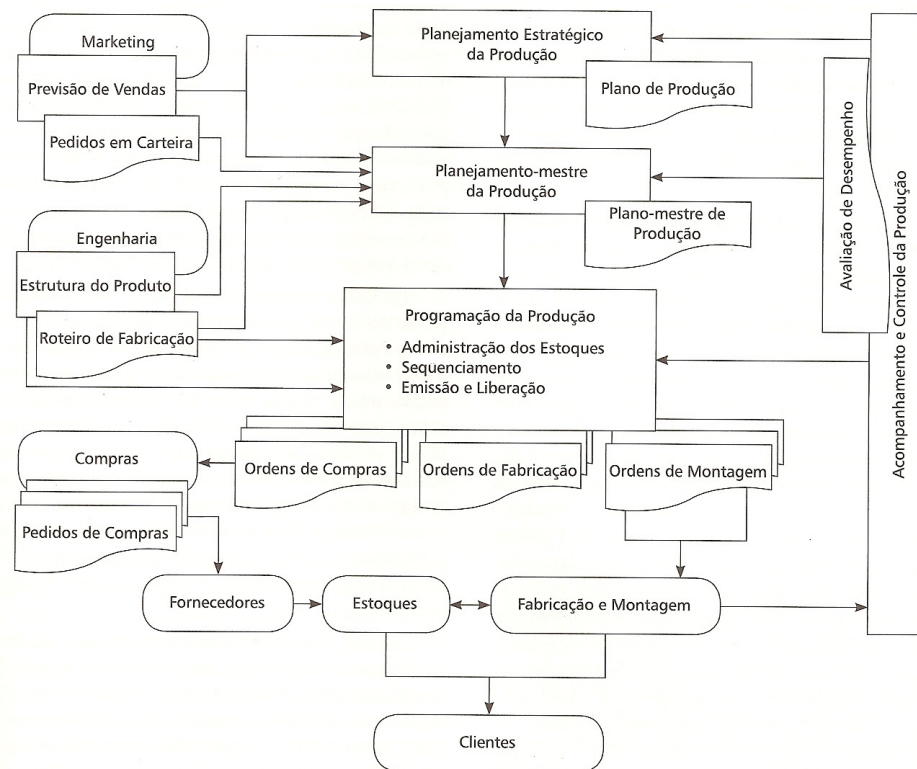


Figura 2.4 – Fluxo de informações e o planejamento e controle da produção
Fonte: Tubino (2007, p. 03)

Dejonckheere et al. (2003) preocupam-se com o relacionamento entre as atividades de planejamento agregado e sequenciamento da produção. Analisam a integração e as semelhanças entre as respostas dinâmicas dos sistemas de planejamento agregado da fábrica e os sistemas de sequenciamento da produção usados no nível individual das unidades de manutenção de estoque. Além disso, Bacheга e Godinho Filho (2005) identificaram os tipos de integração existentes na literatura de gestão da manufatura.

2.6 Considerações Finais

Conceitos sobre planejamento e controle da produção foram explicitados neste capítulo. Verificou-se que não há unicidade na definição de PCP e que houve uma evolução no significado. Foram identificadas definições com foco em: funções administrativas; recursos, métodos e metas; abordagem sistêmica; gestão da cadeia de suprimentos; abordagem hierárquica e departamental/setorial; ferramenta gerencial.

Também, notou-se certa divergência quanto às atividades que compõem o sistema de PCP, a qual é admissível e explicável pelas características organizacionais e administrativas particulares das empresas. Os horizontes de tempo para realização das atividades de planejamento da produção concentram-se no longo e médio prazos e as atividades de controle da produção são realizadas nos horizontes de médio e curto prazos. Destaca-se que o longo prazo está vinculado com o nível estratégico, o médio prazo com o nível tático e o curto prazo com o nível operacional.

Observaram-se os relacionamentos das atividades de PCP com as diversas áreas empresariais, dentre elas *marketing*, engenharia e compras. Além disso, os sistemas de coordenação de ordens, como o *Kanban*, CONWIP, OPT e MRP, podem auxiliar na implementação e operacionalização das atividades de PCP. Ademais, sistemas como o MRP II e o ERP podem apoiar na tarefa de integrar não somente as atividades de PCP, mas também as demais atividades empresariais.

A principal contribuição deste capítulo para a tese é a contextualização dos sistemas de coordenação de ordens perante as atividades de planejamento e controle da produção, mais especificamente quanto às atividades de controle da produção.

CAPÍTULO 3 – SISTEMAS DE COORDENAÇÃO DE ORDENS (SCO)

3.1 Considerações Iniciais

O presente capítulo visa tratar sobre diversos tipos de sistemas de coordenação de ordens (SCO). O foco desta tese são os sistemas *Kanban*, CONWIP e TBC, no entanto, houve a revisão de diversos sistemas de interesse (que são mais discutidos em pesquisas de simulação de ambientes *flow shop*), com intuito de adquirir e aprofundar o conhecimento nesse tema. Para tanto, os objetivos são: i) apresentar conceitos sobre SCO ii) identificar e definir alguns SCO; iii) descrever particularidades, vantagens e desvantagens de alguns SCO; iv) expor o modo de funcionamento desses sistemas. Por meio desses objetivos, foi possível obter e/ou aprofundar o conhecimento sobre SCO e sobre os sistemas tratados nessa tese. Esse capítulo compõe o passo 1 da pesquisa.

Portanto, aqui são abordados os conceitos básicos adotados para a realização da pesquisa. O capítulo é organizado da seguinte forma: na próxima seção são identificados os SCO; a seção 3.3 explicita as particularidades, vantagens, desvantagens e funcionamento de alguns SCO; e na última seção encontram-se as conclusões.

3.2 Os SCO

Fernandes e Godinho Filho (2007, p. 339) e Godinho Filho e Cestario (2008) alocam os SCO em quatro grupos. São eles:

Grupo A) Sistemas de pedido controlado: A manutenção de estoques de produtos finais é impossível. Abrange:

- 1) sistema de programação por contrato;
- 2) sistema de alocação de carga por encomenda.

Grupo B) Sistemas controlados pelo nível de estoque (CNE): as decisões, nestes sistemas, são fundamentadas no nível de estoque, o qual puxa a produção. Abrange:

- 3) sistema de revisão contínua (conhecido, também, como sistema de estoque mínimo, sistema de duas gavetas, sistema de ponto de reposição, entre outros);

- 4) sistema de revisão periódica;
- 5) sistema CONWIP CNE (*Constant Work in Process*);
- 6) sistema *Kanban* CNE;
- 7) TBC CNE (*Two-Boundary Control*);
- 8) sistema Estoque-Base CNE;
- 9) EKCS (*Extended Kanban Control System*);
- 10) GKCS (*Generalized Kanban Control System*);
- 11) BBC CNE (*Behavior-Based control*).

Grupo C) Sistemas de Fluxo Programado: nestes sistemas a produção é empurrada (o fluxo de materiais percorre o mesmo rumo do fluxo de informações). Além do mais, a transformação das necessidades do MPS (*Master Production Schedule* - Programa Mestre de Produção) em necessidades de itens componentes por um departamento de PCP centralizado, geralmente fundamentam a decisão. Compreende os sistemas:

- 12) sistema de estoque base;
- 13) PBC (*Period Batch Control*);
- 14) MRP (*Material Requirement Planning*);
- 15) OPT (*Optimized Production Technology*);
- 16) sistema RL (*Reinforcement Learning*).

Grupo D) Sistemas Híbridos: possuem características dos sistemas das classes (B) e (C).

- 17) sistema de controle MaxMin;
- 18) sistema CONWIP H;
- 19) sistema *Kanban* H;
- 20) sistema DBR (*Drum (tambor), Buffer (pulmão), Rope (corda)*);
- 21) sistema DEWIP (*Decentralized Work in Process*);
- 22) sistema LOOR (*Load Oriented Order Release*);
- 23) sistema POLCA (*Paired-cell Overlapping Loops of Cards with Authorization*);
- 24) TBC H;
- 25) BBC H;
- 26) HPP (*Híbrido Push/Pull*);
- 27) sistema *minimal blocking*.

3.3 Particularidades, vantagens, desvantagens e funcionamento de alguns SCO

Nesta subseção, há a explanação sobre o funcionamento de alguns dos SCO aplicados a ambientes de produção *flow shop*, mais especificamente: *kanban* CNE; CONWIP CNE; MRP; Estoque-base; TBC. No corpo textual da tese será abordado detalhadamente o funcionamento de outros sistemas adequados para ambientes *flow shop*.

3.3.1 *Kanban* CNE

Conforme Fernandes e Godinho Filho (2007, p. 341), *kanban* CNE é constituído pelas “[...] variações do *kanban* que seguem a lógica na qual as decisões (inclusive no último estágio produtivo) são baseadas no nível de estoque”. Dentre as possíveis variações estão o *kanban* de duplo cartão e o *kanban* de cartão único.

Cabe ressaltar algumas particularidades antes de explicitar o funcionamento destas duas variações. Kumar e Panneerselvam (2007), afirmam que o *kanban* é basicamente um cartão plástico, no qual constam informações sobre as peças e também sobre as quantidades a serem feitas. Bose e Rao (1988) *apud* Fernandes e Godinho Filho (2007) complementam informando que o *kanban* possui várias formas, dentre elas, etiqueta, placa, anel e até eletrônico para estações de trabalho distantes.

Quanto à distância entre as estações de trabalho, Hemamalini e Rajendran (2000) apontam as seguintes particularidades: se a distância entre as estações de trabalho consecutivas é muito curta, um único estoque é disponibilizado entre as estações de trabalho. Esta área de armazenagem atua tanto como estoque de saída para uma estação de trabalho ‘j’, como estoque de entrada para a estação de trabalho (ET) subsequente ‘j + 1’, respectivamente. No sistema de cartão duplo, onde a distância entre duas estações de trabalho são maiores, cada estação de trabalho possui separadamente áreas de armazenamento de entrada e áreas de armazenamento de saída.

O sistema *kanban* é mais apropriado para determinadas condições produtivas, tais como: baixa variedade de itens, operações padronizadas, tempos de processamento estáveis, demanda estável, e baixos tempos de *setup* (LAGE JUNIOR; GODINHO FILHO, 2009).

Pinto (2006) apresenta que o *kanban* requer muitas adaptações, tais como: i) precisão nas quantidades produzidas; ii) tempos de troca (*setup*); iii) projetos de produtos e processos adequados; iv) padronização dos processos produtivos; v) sistema de controle de falhas; e vi) atividades de melhoria contínua.

Kim, Chhajed e Palekar (2002) advogam que o sistema *kanban* pode ser aplicado como uma ferramenta de produção na qual se deve considerar o nível de influência direta do cliente. Caso este exerça uma alta influência no sistema produtivo, o *kanban* pode ser utilizado como um sistema de puxar a produção. Na situação contrária, é mais apropriado utilizar o sistema de empurrar a produção.

Os sistemas de produção existentes que se baseiam em cartão de controle, como *kanban*, são principalmente dedicados a ambientes de produção repetitiva (LAND, 2008).

De acordo com Lage Junior e Godinho Filho (2009) e Gaury, Pierreval e Kleijen (2000) *apud* Nazareno (2008), as principais vantagens da utilização do *kanban* são: o controle eficiente dos estágios produtivos; a redução dos níveis de estoque (e, conseqüentemente, redução dos custos de estoque e redução do espaço físico necessário para estoque); a redução dos *lead-times*; a facilitação da identificação da raiz de problemas produtivos; a redução de refugos e retrabalhos; a atribuição de *empowerment* aos operadores; o controle eficiente de informações; e a simplificação dos mecanismos de administração.

Outra vantagem deste sistema é que o controle do fluxo de materiais também favorece a eficiência, pois a redução do estoque torna visíveis os problemas como desbalanceamento da produção, fazendo com que o fluxo não possa continuar até que os problemas sejam corrigidos. Assim, promove-se um sistema de melhoria contínua em produtividade (PINTO, 2006).

Moden *apud* Nazareno (2008) destaca que o sistema *kanban* não possui adaptabilidade para mudanças repentinas e grandes variações na demanda, podendo esta, ser considerada como uma desvantagem.

Kanban de Cartão Único

Um sistema *Kanban* que opera com cartão único é chamado *Kanban* de Ordem de Produção (KOP), conforme Berkley (1992) e Sarathapreeyadarishini *et al.* (1997). Kumar e Panneerselvam (2007) advogam que o KOP é uma ordem de produção, na qual instrui a estação de trabalho precedente a produzir o número requerido de unidades.

O funcionamento deste tipo de sistema pode ser estruturado no conjunto de passos a seguir e visualizado na Figura 3.1:

Passo 1: o contenedor vazio da estação de trabalho subsequente 'j + 1' é movido para a área de armazenagem (que, neste caso, funciona tanto como estoque de entrada da estação de

trabalho 'j + 1' quanto de estoque de saída da estação de trabalho 'j') com o *kanban* de ordem de produção (KOP).

Passo 2: a) conseqüentemente, ele puxa as peças do estoque de saída da estação de trabalho 'j', liberando o KOP no Posto-KOP (Painel) da estação de trabalho 'j'.

b) a estação de trabalho 'j' inicia sua produção de acordo com a ordem de produção contida no seu posto KOP.

Passo 3: o contenedor com as peças e o KOP move-se novamente para sua estação de trabalho subseqüente 'j + 1'.

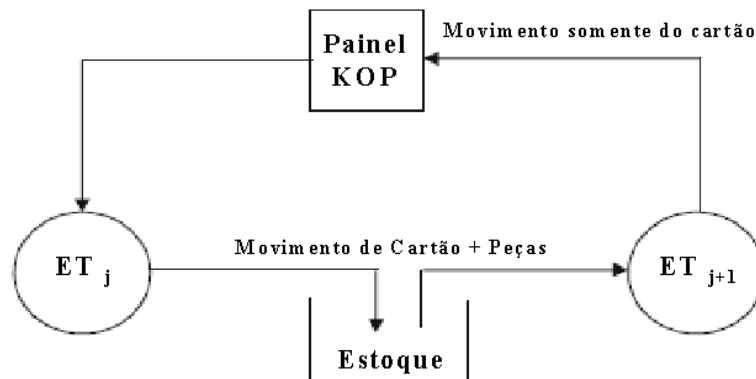


Figura 3.1 – Funcionamento do sistema de cartão único

Fonte: Adaptado de Kumar e Panneerselvam (2007)

Kanban de Duplo Cartão

Nesta variação do sistema *kanban* há a presença do *kanban* de retirada (KR) além do KOP. O *kanban* de retirada (KR), também denominado de *kanban* de transporte, requisição, movimentação e transferência (FERNANDES; GODINHO FILHO, 2007), dá a mensagem para o processo subseqüente sobre o número de unidades que este deve retirar (KUMAR; PANNEERSELVAM, 2007).

Os passos adotados por esta variação do sistema *kanban* são os seguintes e podem ser observados na Figura 3.2:

Passo 1: o contenedor da estação de trabalho subseqüente 'j + 1' é movida para a estação de trabalho 'j' com o KR e coloca este no seu estoque de saída.

Passo 2: a) conseqüentemente, ele puxa as peças do estoque de saída da estação de trabalho 'j' e libera o KOP anexado as peças e então coloca o KOP no Posto KOP (painel) da estação de trabalho 'j'.

b) a estação de trabalho 'j' inicia sua produção de acordo com a ordem de produção contida no seu Posto KOP.

Passo 3: o contenedor com as peças e com o KR move-se novamente para sua estação de trabalho subseqüente 'j+1'. Então ele entrega as peças para o estoque de entrada da estação de trabalho 'j+1' e coloca o KR no Posto KR da estação de trabalho 'j+1'.

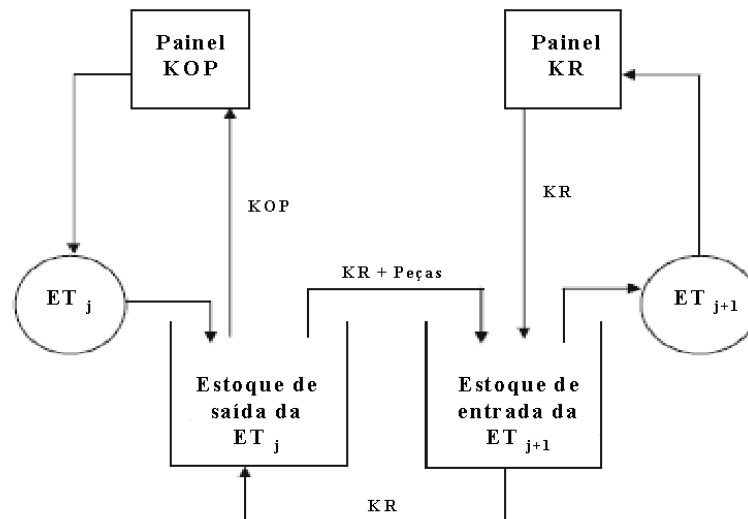


Figura 3.2 – Funcionamento do sistema de cartão único
Fonte: Adaptado de Kumar e Panneerselvam (2007)

3.3.2 CONWIP CNE

CONstant Work In Process (CONWIP) é uma abordagem adequada para sistemas puxados e foi introduzida por Spearman *et al.* (1990), segundo Sipper e Bulfin Jr (1998). Conforme Herer e Masin (1997), este é um sistema de coordenação de ordens fechado no qual um número fixo de contenedores atravessa um circuito que inclui toda a linha de produção. Fernandes e Godinho Filho (2007) advertem que o estoque em processo corresponde ao número de contenedores na linha.

Conforme Hopp e Spearman (2008), no CONWIP o controle de estoque em processo é feito na linha como um todo. Além disso, a carga de trabalho que é especificada nos cartões, e não um produto específico.

Spearman *et al.* (1990) afirmam que o CONWIP é uma forma generalizada de *kanban*. Como o *kanban*, conta com sinais (cartões) para disparar a produção, mas há algumas diferenças entre estes SCO. Em um sistema *kanban*, cada cartão é usado para sinalizar a produção de uma peça específica. Os cartões de produção CONWIP são atribuídos a uma linha de produção, e não a um número específico de peças. O número de peças é atribuído nos cartões no começo da linha de produção, considerando a lista de pedidos em carteira (*backlog list*). Quando o trabalho é demandado na primeira estação de trabalho da linha de produção, o cartão é removido da fila e marcado com o primeiro número de peças da lista de pedidos para cada matéria prima (ou componentes) presente. Os tempos e números de peças são ajustados e também anotados no cartão, como o tempo de entrada no sistema.

As etapas que refletem o funcionamento do CONWIP são estruturadas a seguir e representadas na Figura 3.3:

Passo 1) Um cartão é anexado a um contenedor padrão de peças no início da linha. Este cartão é anexado ao contenedor obedecendo à prioridade que consta na lista de pedidos em carteira (*backlog list*).

Passo 2) O contenedor desloca-se na linha de produção e as peças recebem os processamentos necessários em cada estação de trabalho da linha de produção (ex.: máquina 1, máquina i, máquina M da Figura 3.3).

Passo 3) Quando o contenedor é usado no final da linha, o cartão é removido e retorna para o início, onde espera em uma fila de cartões para eventualmente ser anexado a outro contenedor de peças.

Cabe ressaltar, conforme Sipper e Bulfin (1998), que o CONWIP é mais aplicável em linhas de produção com fluxo uniforme e estável e pode ser usado em ambientes com maior variedade de produtos comparado ao *kanban*.

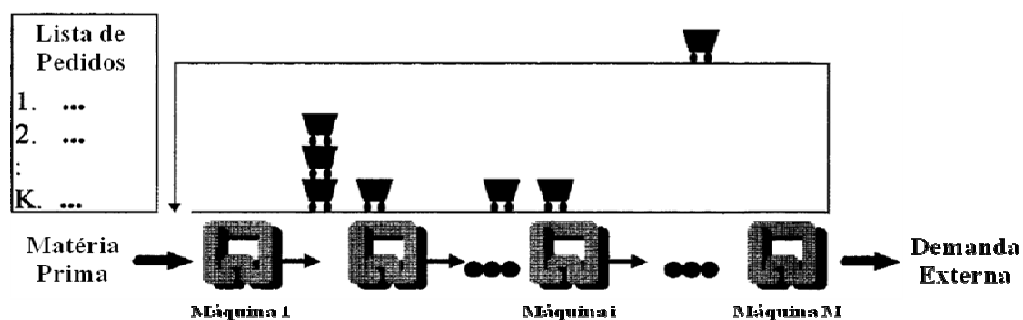


Figura 3.3 – Funcionamento do CONWIP
Fonte: Adaptado de Herer e Masin (1997)

Ovalle e Marquez (2003, p.197) reúnem, por meio da análise de várias pesquisas, as seguintes vantagens do CONWIP em relação a sistemas puxados:

- É mais simples, pois há somente uma única configuração para a contagem do cartão, ao invés de contagem de cartões em cada estação de trabalho;
- Pode prover um *mix* de itens mutável, devido ao uso de cartões para linhas específicas e de uma carteira de trabalho;
- Pode acomodar um gargalo flutuante (dependente do *mix*), devido à tendência natural do WIP ser acumulado em frente à máquina mais lenta;
- Apresenta menor estresse ao operador devido a um protocolo de estímulo mais flexível;
- Em uma linha que produz apenas um único item, o CONWIP tem produzido um *throughput* médio maior, menor variação do *throughput* e um menor volume de estoque máximo que o *kanban*;
- A maioria das pesquisas tem mostrado que o CONWIP produz um *throughput* maior do que o sistema *kanban* para o mesmo número de contenedores (inventário máximo), mesmo para sistemas com perdas na produção. Isto é devido ao controle global existente (de pedidos, pedidos em atraso, e inventário) em um sistema CONWIP;
- Lida com ambientes *flow shop*, com grandes tempos de *setup* e permite um grande mix de produtos;
- O sistema CONWIP é superior a outros sistemas de controle de produção com relação a prazos e tempos de ciclo;
- CONWIP supera *kanban* no que diz respeito aos níveis de estoque médio, quando sujeitos às mesmas exigências de níveis de produção e de serviços (taxa). Além disso, quando o sistema opera próximo à capacidade, o controle híbrido CONWIP em conjunto com *kanban* melhora os níveis de estoque adicionais.
- Muito eficiente para o controle de produção e de estoques de manufatura semi-contínua, podendo reduzir o WIP, o estoque médio e o custo médio de estoque, e garantir maior *throughput* e utilização de recursos.

Quanto às vantagens do CONWIP comparado a sistemas empurrados, Ovalle e Marquez (2003, p.198) apontam:

- As vantagens do CONWIP sobre o MRP residem em menores *lead times*, melhores níveis de serviço e menores WIP e estoques de produtos acabados.
- CONWIP é superior a sistemas empurrados quando o sistema de produção trabalha com taxas de *throughput* maiores possíveis. Além disso, também permite reduzir horas extras;

o nível WIP é diretamente observável; requer menos WIP, em média, para atingir o mesmo *throughput*; é mais robusto a erros nos parâmetros de controle e a trabalhos realizados sob programação, quando as circunstâncias favoráveis permitem isso.

Conforme Dar-El, Herer e Masin (1999), o CONWIP apresenta vantagens em relação aos sistemas abertos. Possui um controle mais fácil, variações menores, e menores níveis de WIP médio (e também menores tempos de fluxo) para o mesmo *throughput*, e também, é auto-regulador.

Ovalle e Marquez (2003, p. 198) expõem as seguintes desvantagens do CONWIP:

- Nem sempre gera o menor número total de movimentações entre os estágios de produção;
- Pode exigir maior espaço de estocagem entre os estágios do que o *kanban*, pois todos os contenedores cheios (com cartões de retirada em anexo) podem acumular-se entre qualquer par de fases alternadas;
- Não considera o impacto que um centro de produção gargalo pode ter no desempenho de uma linha de produção.

3.3.3 MRP

Desde os anos 70, o MRP (*Material Requirements Planning*) tem sido muito popular, se não o mais popular dos SCO. De acordo com Orlicky (1975), as razões deste fato são que o sistema MRP:

- Considera a demanda futura, mesmo que esta varie;
- Considera o relacionamento entre os itens de acordo com a lista de materiais. Os itens não são tratados isoladamente uns dos outros com um risco de obsolescência e estoques não utilizáveis;
- Produz a base para o carregamento de trabalho futuro, mas somente mostra a carga de trabalho de acordo com as ordens atuais dos consumidores.

O MRP utiliza a lista de materiais e os *lead times* dos itens para calcular as quantidades requeridas e as datas de vencimento de cada submontagem e itens componentes. O total requerido de um item é confrontado com o estoque atual e, então as entradas são programadas. Isto determina se alguma ordem já aberta deve ser reprogramada ou cancelada, se alguma ordem planejada deve ser acrescida, e se alguma ordem deve ser liberada. O cálculo inicia com os itens no nível mais alto na estrutura do produto (nível 0) e é executado um nível por vez até o nível mais baixo. O nível mais baixo no qual um item é usado

determina em qual nível da estrutura o item faz parte na rede de cálculo (SEGERSTEDT, 1996).

Segundo Moreira (2008), este sistema é um método de conversão da previsão da demanda de um produto independente em um planejamento prévio das necessidades das partes que compõem o produto. Dolgui e Prodhon (2007) destacam ainda que o objetivo do MRP é determinar um cronograma de reposição para um horizonte de tempo determinado. Sendo assim, o MRP pode ser designado como uma técnica de programação da produção de itens da demanda dependente, uma vez que calcula quanto de cada produto e em que data haverá disponibilidade.

Quando a demanda de um produto depende das forças de um mercado, pode-se dizer que possui demanda independente, por sua vez, quando a demanda de um produto depende da demanda de outro produto, conceitua-se como demanda dependente (MOREIRA, 2008).

A Figura 3.4 mostra a dinâmica do cálculo do MRP, no qual inicia com a liberação de ordens dos itens pais e previsão de demanda do item e finaliza com a liberação de ordens de cada item, considerando o *lead time*.

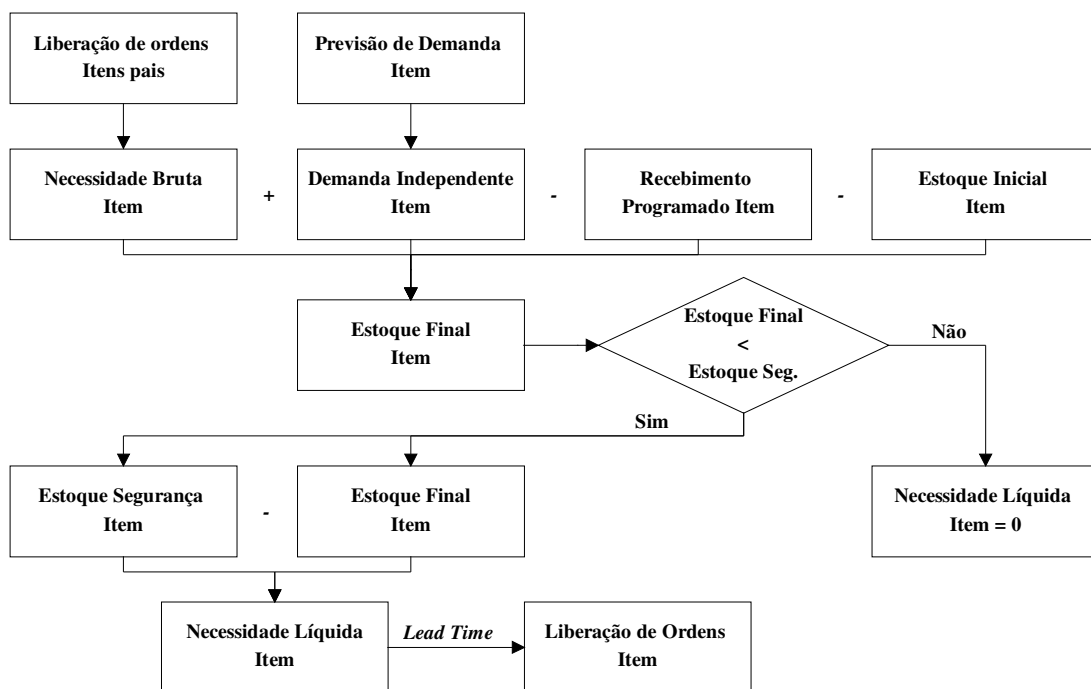


Figura 3.4 – Necessidade líquida e liberação de ordens no MRP
Fonte: Adaptado de Tubino (2007)

Dentre as vantagens do MRP está a flexibilidade a mudanças, diminuição dos custos de estoque e do *leadtime* dos produtos, gerando um aumento da eficiência da fábrica, de serviços ao cliente e reduz os custos operacionais. Lida com situações complexas, que abrangem um amplo número de produtos e estruturas de produtos com vários níveis e componentes por níveis. Pode ser usado principalmente em empresas que têm como objetivos estratégicos e prioritários o cumprimento de prazos e a redução de estoques e, que possua um sistema de produção não repetitivo (MOURA JUNIOR, 1996).

Conforme Dolgui e Prodhon (2007), a principal desvantagem do MRP reside na possibilidade dos dados de entrada serem imprecisos, principalmente nas informações sobre a quantidade de materiais necessários. Essa incerteza pode fazer com que a quantidade de produtos prevista para um período seja diferente da demanda real. Porém, esse problema é minimizado quando se trabalha com estoques de segurança. A utilização dos estoques de segurança é muito comum para limitar os riscos de escassez devido a fatores aleatórios. No entanto, este é um método que pode por vezes ser bastante caro.

Ademais, esse sistema tem a necessidade de uma grande quantidade de dados de entrada, é considerado complexo, possui capacidade ilimitada em todos os recursos, enquanto alguns centros produtivos não comportam a totalidade (MOURA JUNIOR, 1996).

3.3.4 BSCS

Segundo Bonvik, Couch e Gershwin (1997), as referências clássicas sobre o *Base stock control system* (BSCS, ou simplesmente Estoque-base) são: Clark e Scarf (1960), Kimball (1988) e Lee e Zipkin (1992). Zipkin (1995) ampliou o trabalho desenvolvido por Lee e Zipkin (1992). Godinho Filho e Cestario (2008) classificam esse sistema como controlado pelo nível de estoque.

Buzacott e Shanthikumar (1993) *apud* Dallery e Liberopoulos (2000) salientam que o sistema Estoque-base é um mecanismo simples de controle puxado, onde o termo ‘estoque-base’ é derivado da teoria do controle de estoque. Freire (2007) e Santoro e Freire (2008) advogam que o na teoria do controle de estoque, a política de estoque base pode ser considerada como um modelo idêntico ao modelo contínuo de reposição da base, salvo pelos eventos se concentrarem no final do período.

Segundo Kimball (1988) *apud* Bonvik, Couch e Gershwin (1997), o estoque-base limita a quantidade de estoque entre cada estágio de produção e o processo de demanda. Cada máquina tenta manter certa quantidade de material em seu *buffer* de saída, subtraindo a

demanda de produtos acabados listados nos pedidos em carteira, se existir. Esta quantidade é chamada de nível de estoque base da máquina. Bonvik, Couch e Gershwin (1997) salientam que nesse sistema, os níveis de estoque refletem o tempo gasto em cada etapa de produção vezes a taxa de produção.

Fernandes e Godinho Filho (2007) afirmam que este é o SCO mais difícil de classificar, pois:

“Como a informação sobre o que, quanto e quando produzir ou comprar vem do departamento de PCP, ele é um sistema de fluxo programado; como a informação (ordem) vinda do PCP é empurrada em direção à próxima área de estocagem, ele é um sistema que empurra a produção” (FERNANDES; GODINHO FILHO, 2007, p. 342).

Para operar um controle estoque-base, é necessário transmitir a informação de demanda para todos os estágios de produção no momento em que a demanda ocorre. Isto pode ser feito pelo uso de sistemas baseados em cartões, similarmente ao controle *kanban*: anexa um conjunto de cartões em cada unidade de produtos acabados, usando tantos cartões quanto existem estágios de produção. Quando uma unidade é entregue para satisfazer a demanda, o cartão é removido desta unidade, e há a distribuição de um cartão em cada estágio de produção (vide Figura 3.5). ‘ Z_i ’ significa o número de cartões que circulam na célula i . Este autoriza a produção no mesmo modo como no controle *kanban*. Quando uma operação é completada, o cartão é anexado ao produto, e este seguirá o produto até deixar o *buffer* de produtos acabados. Se existe apenas um estágio de produção, este controle é idêntico ao *kanban*. A diferença para linhas mais longas está no fluxo de informação, na distribuição da informação de demanda para todos os estágios, simultaneamente, pelo controle estoque-base (BONVIK; COUCH; GERSHWIN, 1997).

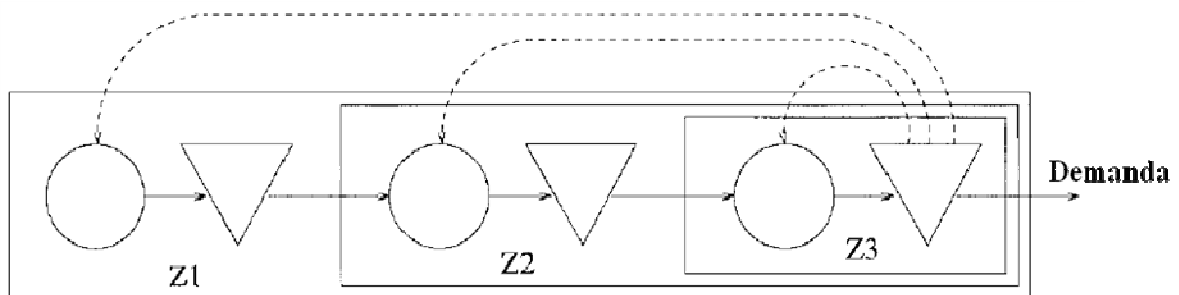


Figura 3.5 – Uma linha de produção controlada pelo Estoque-Base
Fonte: Adaptado de Bonvik, Couch e Gershwin (1997, p. 793)

Diferentes níveis de estoque-base são obtidos pela emissão de um número apropriado de cartões de inicialização para as várias máquinas, com o intuito de preencher os *buffers* nos níveis de estoque-base (BONVIK; COUCH; GERSHWIN, 1997).

Neste SCO, há mais uma particularidade. Quando uma máquina falha, o processo de demanda continuará a remover material do estoque de produtos acabados, e as máquinas a jusante da falha operarão normalmente até ficarem com falta de peças para processar. As máquinas a montante da máquina falha receberão a informação de demanda diretamente do processo de demanda e operará como usualmente. Assim existirá a construção de um inventário na frente da máquina falha. Caso a lista de pedidos em carteira seja permitida, não existe limite superior sobre este acúmulo de estoque (BONVIK; COUCH; GERSHWIN, 1997).

Dallery e Liberopoulos (2000) afirmam que esse SCO depende somente de um parâmetro por estágio (o estoque base do estágio i , sendo $i = 1, \dots, N$), sendo que este influencia a transferência de itens a jusante do sistema. A demanda, por outro lado, é transferida a montante do sistema de produção. A capacidade de produção do BSCS é dada pela capacidade de produção do estágio que tem a menor capacidade de produção, considerando-o isolado de todos os estágios.

De acordo com Burbidge (1988), o SCO Estoque-base é mais aplicável em ambientes produtivos caracterizados por fluxo simples de materiais, amplo número de produtos e que não haja sazonalidade na demanda.

Além disso, o estoque-base apresenta melhor desempenho comparado ao *kanban* dependendo dos parâmetros do sistema. O *kanban* apresenta resultados mais satisfatórios quando a máquina a jusante é o gargalo, enquanto o Estoque-base apresenta melhores resultados quando o gargalo é a montante (VEATCH; WEIN, 1994).

Bonvik, Couch e Gershwin (1997) apresentam proposições de que o estoque-base propicia um fluxo de materiais mais suave. Salienta-se que neste SCO, as informações sobre demanda são repassadas diretamente a todas as máquinas sempre que a demanda ocorrer. No entanto, este sistema pode acumular estoques excessivos. Duenyas e Patana-Anake (1998) também explicitam que, como o estoque-base repassa as informações sobre demanda imediatamente para cada máquina, isto resulta em *work-in-process* (WIP) excessivos nesses estágios quando há muitos pedidos em atraso de produtos acabados.

Veatch e Wein (1994) expõem que o SCO estoque-base dificilmente apresentará um resultado ótimo em ambientes para duas máquinas em linha, com demanda e tempos de processamento com distribuições respectivamente de Poisson e exponencial. A

dificuldade neste caso é a possibilidade de acumular grandes estoques que permanecem no sistema por longos períodos, devido às limitações da capacidade instalada.

3.3.5 TBC

O SCO TBC (*Two-boundary Control*) utiliza uma combinação de dois sistemas, por exemplo, uso conjunto de algumas características do *kanban* com o CONWIP ou do *kanban* com o Estoque-base. Bonvik, Couch e Gershwin (1997), afirmam que em alguns casos, o inventário local formado pelo funcionamento dos SCO Estoque-base e do CONWIP é excessivo. Caso haja alguma máquina gargalo, e as máquinas a montante desta sejam relativamente rápidas e fidedignas, pode-se limitar o estoque formado antes que o nível máximo seja alcançado. Esta situação é mais importante em sistemas onde a lista de pedidos em carteira é permitida.

Bonvik, Couch e Gershwin (1997) e Liberopoulos e Koukoumialos (2005) estudaram sistemas que são híbridos dos SCO estoque-base e *kanban*, isto é, onde a informação de demanda é propagada diretamente como no estoque-base, mas onde existe, também, limite de estoque como no *kanban*. Van Ryzin, Lou e Gershwin (1993) realizaram experimentos numéricos que mostraram que estas abordagens são mais próximas a situação ótima para linhas de dois estágios.

Neste sistema, o tamanho do *buffer* de produtos acabados deve ser pelo menos tão grande quanto o nível de estoque-base da última máquina para permitir que a máquina alcance a produção alvo. Na perspectiva híbrida, ao invés de liberar cartões *kanban* do estoque de produtos acabados para o último estágio de produção quando as peças são usadas, há o envio destes cartões para o primeiro estágio para autorizar o carregamento de outra peça no sistema. Este *kanban* seguirá a peça todo o caminho através do sistema, enquanto outros cartões *kanban* recirculam para limitar o local de acumulação de estoque. Além disso, nenhum *kanban* separado é necessário para a sincronização do último estágio produtivo com a linha de montagem, visto que a quantidade de material na linha inteira nunca pode exceder o estoque permitido neste *buffer* (BONVIK; COUCH; GERSHWIN, 1997).

Ainda conforme estes autores, o TBC ainda pode ser originado do CONWIP, no qual há a limitação de níveis de estoque intermediário local (*buffers*), como pode ser visto na Figura 3.6. Note que ‘Ni’ representa o número de cartões *kanban* circulando na célula ‘i’.

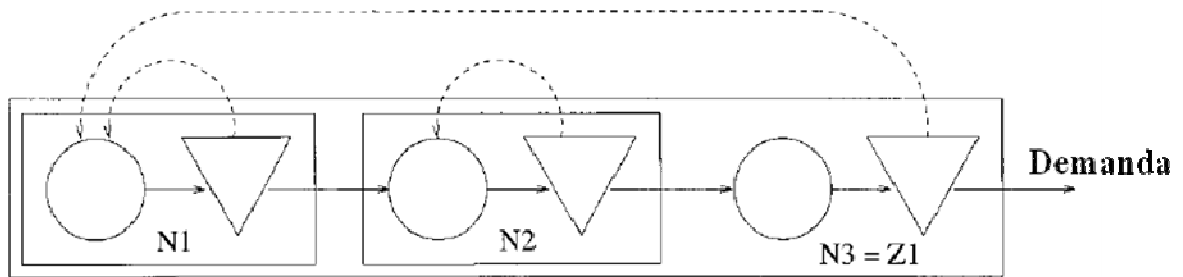


Figura 3.6 – Linha de produção controlada por *Kanban-CONWIP* híbrido
 Fonte: Adaptado de Bonvik, Couch e Gershwin (1997, p. 795)

Assim, nesse formato do TBC (*Kanban-CONWIP*), o mecanismo de controle do WIP local usa cartões *kanban* e o controle do estoque global usa CONWIPs. A demanda de informação é transferida para o primeiro estágio usando o mecanismo CONWIP. Entretanto, este fluxo de informação pode ainda ser parado se não existir estoque de produtos acabados ao momento da chegada da demanda (BOONLERTVANICH, 2005).

Godinho Filho e Cestario (2008) salientam que o TBC pode ser classificado como um sistema controlado pelo nível de estoque (TBC CNE) caso o funcionamento do CONWIP seja baseado somente no nível de estoque. Entretanto, se o funcionamento do CONWIP seja baseado em uma programação da produção dada por um Planejamento e Controle da Produção centralizado, este pode ser classificado como um sistema híbrido (TBC H).

Algumas vantagens do TBC foram expostas por Bonvik, Couch e Gershwin (1997) em uma comparação entre os sistemas *kanban*, *minimal blocking*, estoque-base, CONWIP e TBC realizada por meio de simulação de um pequeno fluxo em linha que produz um único item, considerando taxas de demanda constante e variável com o tempo. A política de controle híbrido (TBC) apresentou um desempenho superior ao alcançar altos níveis de serviço com estoques mínimos, seguido do CONWIP e do estoque-base. Com isso, o TBC permite melhoria contínua da produtividade e do nível de serviço, além do que é atingível somente com o controle *kanban*, ao fazer o sistema de produção mais responsivo a ajustes nas taxas de produção.

Porém, o TBC é um sistema de controle mais complexo, por utilizar características de dois sistemas e necessita da definição de três parâmetros (ponto de cobertura do *buffer* e dois pontos de cobertura excedentes, um para a máquina antecessora e outro para a subsequente; para maiores detalhes ver Yi (2007)), não podendo estes ser chamados de limites (SAMARATUNGA; SETHI; ZHOU, 1997). Ao contrário, estes atraem as possíveis

trajetórias ótimas emanadas de diferentes estados iniciais. Além disso, ao contrário de uma noção tradicional, não existe algo como uma ‘política *kanban* ótima’ ou uma ‘política TBC ótima’, quando tratado do caso de custo descontado. Isto ocorre porque os valores ótimos dos parâmetros necessários dependem do estado inicial (SAMARATUNGA; SETHI; ZHOU, 1997).

3.3.6 GKCS

O GKCS é um SCO oriundo do *kanban* tradicional e do estoque-base, tendo como os seus idealizadores Buzacott (1989) e Zipkin (1989). O *kanban* é geralmente utilizado no controle de liberação de peças em diversos estágios da produção, no qual opera com o mecanismo de produção puxada, ou seja, a demanda vai influenciar no que será produzido (KUMAR; PANNEERSELVAM, 2007). O estoque-base busca limitar a quantidade do estoque entre cada estágio da produção, evitando ter excessos no processo produtivo e de demandas, trazendo a ideia que cada máquina possui um nível de estoque base (BONVIK *et al.*, 1997).

Segundo Frein, Di Mascolo e Dallery (1995), o GKCS inclui como casos especiais os sistemas *kanban*, CONWIP e estoque-base. É constituído por um subsistema de produção, possuindo dois parâmetros delineados para cada estágio do sistema de produção. Um dos parâmetros controla o WIP total do estágio e o outro determina a meta em termos de número de produtos que devem ser produzidos para serem estocados na saída do estágio. Assim, se o sistema de produção é composto de N estágios, existem 2N parâmetros que devem ser determinados. Os valores específicos desses parâmetros têm um alto impacto sobre a eficiência da política desse SCO.

A forma de funcionamento do GKCS é muito parecida com o sistema *kanban*. A diferença é que no GKCS existem cartões *kanban* adicionais livres, o que possibilita que, mesmo quando não há itens finalizados em determinado estágio produtivo, a demanda requerida possa ser transferida para o próximo estágio (KARAESMEN; DALLERY, 2000).

Fernandes e Godinho Filho (2007, p.339) alocam os SCO em quatro grupos: a) Sistemas de pedido controlado; b) Sistemas controlados pelo nível de estoque (CNE); c) Sistemas de fluxo programado; e d) Sistemas híbridos, nos quais possuem características dos sistemas das classes ‘b’ e ‘c’. Também, esse sistema pode ser caracterizado como um sistema controlado pelo nível de estoque, ou grupo ‘b’ (GODINHO FILHO; CESTARIO, 2008).

A Figura 3.7 mostra o esquema de funcionamento do GKCS em uma linha de produção com dois estágios produtivos, segundo Selvaraj (2009). Dentre outros trabalhos que apresentam esse sistema são Baynat, Buzacott e Dallery (2002) e Dallery e Liberopoulos (2000).

Cada estágio 'i' tem 'ki' *kanbans* para autorizar a produção do estágio 'i'. Inicialmente, todos os *kanbans*, 'ki', no estágio 'i' são estocados em filas 'Ki'. Estoque 'Bi', sendo $i = 1 \dots N$, tem 'Si' itens acabados do estágio 'i' com 'B0' representando o estoque de matéria-prima. As demandas de produção dos itens do estágio-i estão agora estocadas em duas filas: fila 'Di' somente contém demandas, e a fila 'DKi' contém *kanbans* do estágio 'i' que foram desencadeados pela demanda de informação do estágio posterior. O GKCS depende de dois parâmetros por estágio, que são a quantidade de *kanbans* em cada estágio, 'ki', e o nível de estoque base do estágio, 'Si' (SELVARAJ, 2009).

O funcionamento do GKCS é da seguinte forma, conforme Selvaraj (2009). Quando a demanda do consumidor chega ao sistema, esta é instantaneamente dividida em duas demandas:

- i) a primeira demanda irá se juntar a fila 'D' solicitando a liberação de produtos acabados de B2 para o consumidor;
- ii) a segunda demanda irá se juntar a fila 'D2', solicitando a produção no estágio 2. Quando a primeira demanda chega em 'D', se um item está disponível em 'B2', este é liberado para o consumidor. Caso contrário, a demanda é colocada na lista de pedidos e tem que esperar pela chegada de um produto acabado em 'B2'.

Quando a segunda demanda chega em 'D2', se o *kanban* do estágio-2 está disponível em 'K2', a informação da demanda é imediatamente transmitida à montante para 'D1'. O *kanban* de estágio-2 será movido para a fila 'DK2' autorizando a produção no estágio 2. Se um novo item está disponível em 'B1', este é instantaneamente absorvido pelo *kanban* do estágio-2 em 'DK2' e ambos (item e *kanban*) são liberados em 'MP2'. Caso contrário, o *kanban* tem que esperar na fila 'DK2' por um item acabado a chegar em 'B2'. Se nenhuma *kanban* do estágio-2 está disponível em 'K2', a demanda tem que esperar por um *kanban* do estágio-2. A informação de demanda será interrompida a montante dos estágios produtivos. Assim que 'Bi-1' ou 'ki' receberem a informação de demanda, o ciclo será repetido.

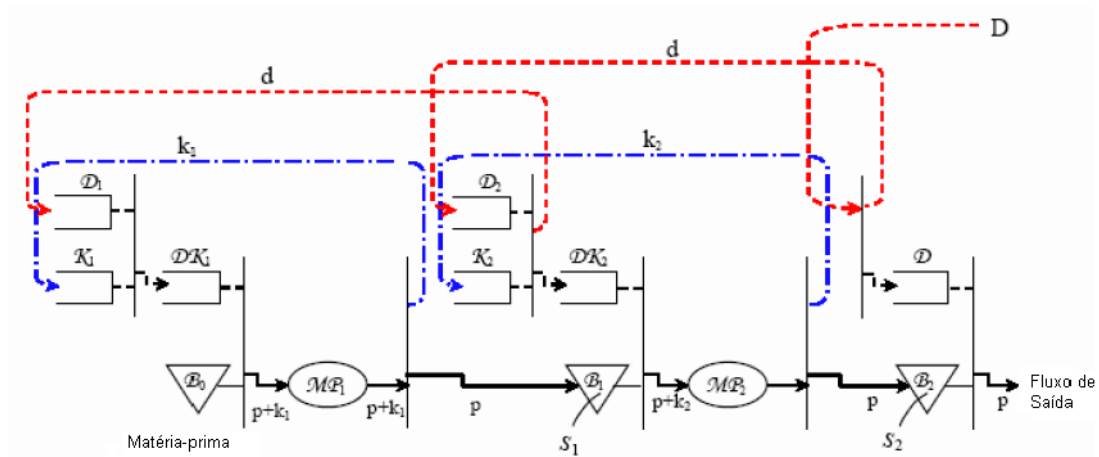


Figura 3.7 – O funcionamento do GKCS em uma linha de produção com dois estágios produtivos

Fonte: Adaptado de Selvaraj (2009, p. 46)

A vantagem mais evidente do GKCS, apontada em diversos estudos simulados com intuito de verificar o desempenho deste SCO, é sua flexibilidade e aderência às flutuações da demanda (LAGE JUNIOR; GODINHO FILHO, 2008).

Bayanat, Buzacott e Dallery (2002) apontam como vantagens do GKCS, em comparação ao *kanban*, a maior versatilidade e o melhor desempenho. Esse sistema reduz a dependência entre a transferência de cartões *kanban* e demandas, por um lado, e a liberação de peças, por outro.

Uma desvantagem desse SCO é que trata-se de um mecanismo de controle puxado mais complexo do que o *kanban* (BAYANAT; BUZACOTT; DALLERY, 2002). Parte dessa complexidade é dada pela necessidade de definição de dois parâmetros de controle entre os estágios produtivos (FREIN; DI MASCOLO; DALLERY, 1995). Lage Junior e Godinho Filho (2008) expõem também a necessidade de delimitar o estoque de segurança e o número de sinalizadores de ordem de produção.

3.4 Considerações Finais

Nesse capítulo foram apresentados conceitos sobre SCO. Houve a categorização dos sistemas quanto aos grupos a que pertencem. Os grupos são compostos por sistemas de pedido controlado, sistemas controlados pelo nível de estoque, sistemas de fluxo programado e sistemas híbridos. Verificou-se, também, a existência de pelo menos vinte e sete SCO.

Além disso, houve a descrição de particularidades, vantagens, desvantagens, bem como o funcionamento dos sistemas *Kanban* CNE de cartão único e de duplo cartão, CONWIP CNE, MRP, BSCS, TBC e GKCS. O Quadro 3.1 apresenta as principais vantagens e desvantagens verificadas dos SCO analisados nesse capítulo.

Quadro 3.1 – Principais vantagens e desvantagens dos SCO

SCO	Vantagens	Desvantagens
Kanban	controle eficiente dos estágios produtivos	pouca adaptabilidade a mudanças repentinas
	redução dos níveis de estoque	pouca adaptabilidade grandes variações na demanda
	redução dos custos de estoque	
	redução do espaço físico necessário para estoque	
	redução dos <i>lead-times</i>	
	facilitação da identificação da raiz de problemas produtivos	
	redução de refugos e retrabalhos	
	atribuição de <i>empowerment</i> aos operadores	
	controle eficiente de informações	
	simplificação dos mecanismos de administração	
	controle do fluxo de materiais também favorece a eficiência	
CONWIP	maior simplicidade devido a única configuração para a contagem do cartão	nem sempre gera o menor número total de movimentações entre os estágios de produção
	pode prover um <i>mix</i> de itens mutável	pode exigir maior espaço de estocagem entre os estágios do que o <i>kanban</i>
	pode acomodar um gargalo flutuante	não considera o impacto que um centro de produção gargalo pode ter no desempenho de uma linha de produção.
	apresenta menor estresse ao operador	
	melhores prazos de execução da tarefa e tempos de ciclo	
	trabalha com taxas de <i>throughput</i> maiores possíveis	
	lida com ambientes <i>flow shop</i> , com grandes tempos de <i>setup</i> e permite um grande <i>mix</i> de produtos	
variações menores e é auto-regulador		
MRP	considera a demanda futura, mesmo que esta varie	possibilidade dos dados de entrada serem imprecisos
	considera o relacionamento entre os itens de acordo com a lista de materiais	necessidade de uma grande quantidade de dados de entrada
	produz a base para o carregamento de trabalho futuro	sistema considerado complexo
	flexibilidade a mudanças	possui capacidade ilimitada em todos os recursos
	diminuição dos custos de estoque e do <i>leadtime</i> dos produtos	
	aumento da eficiência da fábrica e de serviços ao cliente	
	reduz os custos operacionais	
lida com situações complexas		
BSCS	propicia um fluxo de materiais mais suave	pode acumular estoques excessivos
	informações sobre demanda são repassadas diretamente a todas as máquinas sempre que a demanda ocorrer	estoques que permanecem no sistema por longos períodos
	lida bem com amplo número de produtos	não lida bem com sazonalidade na demanda e com fluxos complexos de materiais
TBC	alcança altos níveis de serviço com estoques mínimos	sistema de controle mais complexo
	permite melhoria contínua da produtividade e do nível de serviço	inexistência de 'política TBC ótima', quando tratado do caso de custo descontado
GKCS	flexibilidade e aderência às flutuações da demanda	trata-se de um mecanismo de controle puxado mais complexo
	maior versatilidade e o melhor desempenho	necessidade de delimitar o estoque de segurança e o número de sinalizadores de ordem de produção
	reduz a dependência entre a transferência de cartões <i>kanban</i> /demandas e a liberação de peças	

Notou-se a complexidade envolvida na forma de coordenação das ordens desses sistemas. Além disso, verificou-se que algumas vantagens e desvantagens de determinados sistemas giram em torno da sensibilidade de medidas de desempenho adotadas no momento da análise. Portanto, em determinados estudos tal SCO pode assumir comportamento satisfatório e, em outros estudos, apresentar a situação contrária. Esses fatos

demandam grande atenção na etapa de modelagem dos sistemas no caso real da empresa estudada.

A principal contribuição deste capítulo para a tese é a aquisição e/ou aprofundamento de conhecimento sobre os SCO, o que foi necessário para dar embasamento teórico-conceitual para a simulação computacional dos sistemas tratados no capítulo 6.

CAPÍTULO 4 – TRABALHOS QUE RELACIONAM UM OU MAIS SCO EM AMBIENTES *FLOW SHOP* COM USO DE SIMULAÇÃO

4.1 Considerações Iniciais

Neste capítulo, há a apresentação de trabalhos que comparam SCO em ambientes do tipo *flow shop*, via simulação. Primeiramente, há a exposição organizada dos trabalhos identificados sobre tal tema, contendo os autores e datas dos trabalhos, número de centros de trabalho, a natureza dos dados utilizados (real ou hipotético), as medidas de desempenho, sistemas comparados, quantidade de tipos de itens, simulador ou linguagem de simulação utilizada e o vínculo da publicação. Posteriormente, há o detalhamento do conteúdo desses artigos quanto ao objetivo da pesquisa realizada e principais resultados encontrados, além das formas de análise efetuadas e resultados específicos dos SCO *kanban*, CONWIP e TBC, e as considerações finais.

Cabe ressaltar que a estrutura de modelo utilizada em todos esses trabalhos é a simulação, pelo menos em alguma etapa da pesquisa. Destaca-se que há trabalhos na literatura de engenharia de produção que também realizam tal relacionamento de SCO por meio outras técnicas, como programação matemática, cadeias de Markov, entre outros (AKTURK; ERHUN, 1999).

4.2 Revisão, classificação e estruturação da literatura sobre comparação de SCO em ambientes *flow shop* via simulação

Realizou-se uma revisão da literatura que contempla a comparação de SCO por meio de simulação em ambiente de produção *flow shop* e verificaram-se 31 trabalhos. Para tal revisão, foram consultadas as bases de dados ‘Engineering Village’ e ‘Scielo’, os sites de busca ‘Google’ e ‘Google Acadêmico’, bancos de teses e dissertações de universidades nacionais, e anais dos eventos ENEGEP (Encontro Nacional de Engenharia de Produção), SIMPEP (Simpósio de Engenharia de Produção) e SBPO (Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional). Dentre as palavras-chave utilizadas estão os nomes completos dos SCO existentes, as siglas dos SCO, ‘*flow shop*’, ‘*ordering systems*’, ‘*simulation*’, ‘simulação’, ‘*production planning and control*’, ‘planejamento e controle da produção’, ‘*production control strategies*’, ‘estratégias de controle da produção’, e suas combinações.

As categorias utilizadas na classificação dos trabalhos analisados são:

- i) Autor(es) e data de publicação: os trabalhos encontrados foram expostos em ordem cronológica, sendo que a abrangência temporal destes foi de 1987 até 2009.
- ii) Número de centros de trabalho: verificou-se que o número de centros de trabalho simulados variaram de três até cinquenta.
- iii) Variedade de itens simulados: esta categoria explicita a variedade de itens a serem processados nos modelos elaborados. Identificou-se que os tipos variaram de 1 a 120 itens simulados.
- iv) Natureza dos dados utilizados: especificou-se se os dados usados nos modelos podem ser reais, ou seja, dados coletados em empresas para a realização da comparação dos SCO, ou hipotéticos, que seriam dados atribuídos pelos pesquisadores para a representação dos modelos estudados. Notou-se que apenas nove dos casos foram reais.
- v) Simulador ou linguagem de simulação utilizada: notou-se a evolução do uso de linguagens de simulação e de programação para o uso de softwares de simulação comerciais com o passar dos anos.
- vi) Sistemas comparados: os sistemas comparados que compõem a classificação apresentada no capítulo 3 foram: MRP, *Kanban* (cartão único e duplo), EKCS, Estoque-base, CONWIP CNE, CONWIP H, DBR, TBC, RL, BBC, *Minimal blocking* e POLCA. Também, foram comparados sistemas empurrados, puxados, híbrido empurrado-puxado, híbrido puxado-empurrado, JIT (*just in time*), PAC (*Production Authorization Card*), gPOLCA, TOC, MODMRP, linha balanceada, ROP (*Re-Order Point system*), políticas *clockwork* e PFB (*pull from bottleneck*). Maiores informações sobre esses sistemas podem ser encontradas nos trabalhos citados no Quadro 4.1.
- vii) Medidas de desempenho: dentre as medidas de desempenho utilizadas para a avaliação dos sistemas de coordenação de ordens estão: *lead time*, *throughput*, nível de serviço, *work in process* (WIP), saídas do sistema, custo, lucro, tamanho de fila gerada, eficiência da linha, tempo de ciclo, entre outros. Salienta-se que devido a uma padronização dos conceitos e definições das medidas de desempenho utilizadas em grande parte dos trabalhos analisados, optou-se por tabular esses dados segundo a nomenclatura presente nos trabalhos.
- viii) Demais configurações: correspondem às outras configurações consideradas nos modelos realizados nos trabalhos verificados.
- ix) Objetivo: trata-se dos objetivos das pesquisas realizadas nos trabalhos analisados. Tais objetivos são detalhados na seção 4.3, juntamente com os principais resultados alcançados em cada trabalho.

xx) Publicação: foram expostos os vínculos das publicações encontradas em periódicos internacionais, conferências internacionais e universidades nacionais e internacionais que disponibilizaram teses e dissertações relacionadas ao tema.

O Quadro 4.1 expõe os trabalhos classificados, conforme as categorias anteriormente especificadas, em ordem cronológica.

Quadro 4.1 – Trabalhos que relacionam um ou mais SCO em um ambiente *flow shop* via simulação (continua...)

Autores	Nº centros de trabalho	Tipos de itens	Real ou Hipotético	Simulador / linguagem de simulação	Sistemas comparados	Medidas de desempenho	Demais configurações	Objetivo	Publicação
Krajewski <i>et al.</i> (1987)	50	50	Real	MASS - Simulador de eventos-discretos	MRP, <i>Kanban</i> , ROP-semanal e ROP-diário	Necessidade de trabalho, estoque e demandas não atendidas.	Refugo, falha de equipamento, tamanho do lote, tempo de <i>setup</i> , perda de rendimento, flexibilidade de força de trabalho, grau de customização e estrutura do produto.	Avaliar se o sistema <i>kanban</i> pode ser bem executado nos ambientes produtivos de empresas dos EUA e avaliar quais os fatores em um ambiente de produção têm maior impacto no desempenho, independente de seu sistema em uso.	Management Science
Sarker e Fitzsimmons (1989)	9	1	Hipotético	SALM-linguagem de simulação	Sistemas puxados (<i>Kanban</i>) e empurrados	Eficiência da linha, comprimento da fila, quantidade de saídas do sistema, WIP e utilização da máquina.	<i>Setup</i> , quebra de máquina e tempo de reparo.	Investigar os efeitos das variabilidades no desempenho dos sistemas puxados e empurrados e como o gestor pode decidir qual técnica de produção adotar.	International Journal of Production Research
Ramsay, Brown e Tabibzadeh (1990)	4	2	Hipotético	Não especificado	MRP, <i>Kanban</i> e OPT	Momento de liberação da ordem e autorização da produção.	Gargalo e <i>setup</i> .	Testar a aplicabilidade do MRP, <i>Kanban</i> e OPT sob diferentes circunstâncias, por meio de modelos de simulação computacional.	Industrial Engineering
Spearman, Woodruff e Hopp (1990)	10	2	Hipotético	Não especificado	Sistema empurrado e CONWIP	Lucro, WIP e controlabilidade.	Ambiente com condições totalmente favoráveis.	Descrever um novo sistema puxado CONWIP e expor vantagens práticas deste sistema sobre sistemas empurrados e puxados.	International Journal of Production Research
Cook (1994)	5	1	Hipotético	Não especificado	Sistema Tradicional, JIT e TOC	WIP, tempo de fluxo, desvio padrão do tempo de fluxo e total de saídas.	Sem <i>setup</i> e com gargalo.	Comparar os sistemas TOC, JIT e tradicional com uso de simulação computacional.	Production and Inventory Management Journal
Duclos e Spencer (1995)	17	5	Real	Não especificado	MRP, DBR e MODMRP	<i>Throughput</i> , estoque no sistema e falta de estoque.	<i>Setup</i> e não incorporou tempo de inatividade por quebra.	Refinar e esclarecer os conceitos sobre gerenciamento da programação de operações, apresentando os resultados de uma simulação baseada em dados empíricos comparando TOC com um sistema MRP em um <i>flow shop</i> .	International Journal of Production Economics

Quadro 4.1 – Trabalhos que relacionam um ou mais SCO em um ambiente *flow shop* via simulação (continua...)

Autores	Nº centros de trabalho	Tipos de itens	Real ou Hipotético	Simulador / linguagem de simulação	Sistemas comparados	Medidas de desempenho	Demais configurações	Objetivo	Publicação
Chakravorty e Atwater (1996)	4, 5 e 6	1	Hipotético	SLAM II - Linguagem de simulação	JIT, TOC e Linha balanceada	Saidas do sistema.	Falhas de equipamentos, tempo de reparo	Estudar, via simulação, as taxas de saída de uma linha balanceada, de uma linha JIT e de uma linha TOC.	International Journal of Operations & Production Management
Gstettner e Kuhn (1996)	5	1	Hipotético	SIMAN - Linguagem de simulação	Kanban e CONWIP	Throughput e WIP.	Não especificado.	Comparar dois sistemas puxados de controle da produção quanto ao <i>throughput</i> e WIP.	International Journal of Production Research
Bonvik, Couch e Gershwin (1997)	4	1	Real	Software de simulação programado em Linguagem C	Kanban, <i>Minimal Blocking</i> , Estoque-base, CONWIP e TBC (Kanban-CONWIP)	Nível de serviço, nível de WIP e variabilidade ao longo da linha.	Tamanho do <i>buffer</i> , nível de estoque-base, falha de máquina e alteração da taxa de demanda	Estudar o desempenho do Kanban, <i>Minimal blocking</i> , estoque-base, CONWIP e TBC (kanban-CONWIP) em uma linha de produção que produz itens para uma linha de montagem automobilística.	International Journal of Production Research
Huang, Wang e Ip (1998a)	10	2	Real	Software de simulação programado em Linguagem C	CONWIP e Sistema empurrado	WIP total, estoque médio, custo médio de estoque, utilização das máquinas e <i>throughput</i> .	Gargalo.	Introduzir o estudo de simulação, de aplicação do CONWIP, em um ambiente de manufatura semi-continua (uma usina de laminação a frio).	International Journal of Production Economics
Huang, Wang e Ip (1998b)	10	2	Real	Software de simulação programado em Linguagem C	CONWIP, Kanban, MRP	WIP total, estoque médio, custo médio de estoque, utilização das máquinas e <i>throughput</i> .	Gargalo.	Comparar, por meio de uma análise de simulação, três sistemas de controle (MRP, Kanban e CONWIP) implementados em um ambiente de manufatura semi-continua: uma usina de laminação a frio.	Production Planning & Control
Takahashi e Nakamura (1998)	5	1	Hipotético	Não especificado	Kanban puro, kanban conhecido na literatura e simultâneo	Tempo médio de espera do produto demandado e WIP total médio.	Produto padronizado, <i>make to stock</i> , aceita pedidos atrasados/pendentes, estoque intermediário.	Formular um modelo matemático para cada alternativa de sistema, explicar as propriedades estruturais dos modelos, e analisar e comparar os desempenhos dos modelos por meio de simulação.	Production Planning & Control

Quadro 4.1 – Trabalhos que relacionam um ou mais SCO em um ambiente *flow shop* via simulação (continua...)

Autores	Nº centros de trabalho	Tipos de itens	Real ou Hipotético	Simulador / linguagem de simulação	Sistemas comparados	Medidas de desempenho	Demais configurações	Objetivo	Publicação
Gaury, Pierreval e Kleijnen (2000)	6, 8 e 10	1	Hipotético	Linguagem SIMAN	CONWIP, Kanban e Híbrido Kanban/CONWIP (TBC)	WIP e nível de serviço	Número de cartões kanban e número de cartões CONWIP.	Propor uma nova abordagem que permita ambas seleções de estratégias de controle Kanban, Conwip e Kanban/Conwip híbrido e a determinação dos valores dos respectivos parâmetros, para otimizar um dado desempenho para um dado sistema de produção.	Journal of Intelligent Manufacturing
Yang (2000)	5	6	Hipotético	SLAM II - Linguagem de simulação	Kanban de cartão único, Kanban de cartão duplo e CONWIP	Atendimento ao cliente, WIP, movimentação de material.	regras de prioridade, número de cartões, política de transferência e ciclo de retirada	Comparar os sistemas Kanban de cartão único, Kanban de cartão duplo e CONWIP	Production and Operations Management
Marek, Elkins e Smith (2001)	4	1	Hipotético	ARENA (SIMAN)	Kanban e CONWIP	WIP	Gargalo e número de cartões.	Apresentar uma visão geral e tutorial introdutórios em modelagem e controle, via simulação com ARENA/SIMAN, dos sistemas seriais puxados Kanban e CONWIP.	Winter Simulation Conference
Paternina-Arboleda e Das (2001)	4	1	Hipotético	ARENA (SIMAN)	Kanban, CONWIP, Estoque-base, TBC, EKCS, RL (<i>reinforcement learning</i>), BBC (<i>behavior-based control</i>)	Nível médio de WIP, nível de serviço e custo médio de WIP	Falhas e demanda não satisfeita é perdida.	Desenvolver uma metodologia que, para um dado sistema, encontre uma política de controle dinâmica via agentes inteligentes.	IIE Transactions
Gilland (2002)	9	1	Real	Arena	CONWIP, DBR, políticas <i>clockwork</i> e PFB (<i>pull from bottleneck - PFB1, PFB2, PFB3</i>)	Taxa de saída e nível de WIP	Gargalo.	Fornecer ideia sobre qual política oferece melhor desempenho, e como a escolha de parâmetros afetam o desempenho de uma dada política.	Production Planning & Control

Quadro 4.1 – Trabalhos que relacionam um ou mais SCO em um ambiente *flow shop* via simulação (continua...)

Autores	Nº centros de trabalho	Tipos de itens	Real ou Hipotético	Simulador / linguagem de simulação	Sistemas comparados	Medidas de desempenho	Demais configurações	Objetivo	Publicação
Krishnamurthy (2002)	3	8	Hipotético	ProModel	MRP, Kanban, CONWIP CNE, CONWIP H e POLCA	WIP e <i>throughput</i> .	Setup, unidade de demanda em lote, suprimento suficiente de matéria-prima.	Estabelecer uma metodologia para avaliação de desempenho de estratégias de controle de materiais para sistemas de manufatura.	Universidade de Winsconsin-Madison
Takahashi e Nakamura (2002)	5	1	Hipotético	Não especificado	Kanban e CONWIP	WIP médio total e tempo médio de espera do produto demandado.	Estoque intermediário e condições estáveis e instáveis de demanda.	Comparar um sistema kanban reativo com um sistema CONWIP reativo sob condições de mudanças instáveis na demanda, utilizando experimentos de simulação.	Production Planning & Control
Takahashi (2003)	5	1	Hipotético	Não especificado	Sistemas reativos Kanban: baseado em controle gráfico, baseado em antecipação de estoque e baseado em estoque	WIP médio total e tempo médio de espera do produto demandado.	Número de cartões.	Analisar e comparar o desempenho de sistemas kanban reativos, baseados em controle gráfico e em estoque. Além disso, comparar o desempenho desses sistemas com o novo sistema proposto baseado em estoque.	International Journal of Production Research
Geraghty e Heavey (2004)	5	1	Hipotético	eM-Plant (Tecnomatix GmbH)	HPP e TBC	Custos de estoque e de falta, ganho, WIP médio e nível de serviço.	Estoque de segurança e estoque ótimo.	Comparar a política de controle Híbrido Empurrado/Puxado (HPP) com a política de controle CONWIP.	International Journal of Production Economics
Krishnamurthy, Suri e Vernon (2004)	3	8	Hipotético	ProModel	MRP e Kanban	nível de serviço, espera média de ordem atrasada e nível médio de estoque.	Estoque intermediário no início e no fim da estação de trabalho, suprimento suficiente de matéria-prima, estoque de segurança e <i>lead time</i> de segurança.	Analisar o desempenho do sistema sob diferente gama de produtos e observar que em certos ambientes com antecipação de informação de demanda, o kanban pode causar ineficiências significativas.	International Journal of Flexible Manufacturing Systems

Quadro 4.1 – Trabalhos que relacionam um ou mais SCO em um ambiente *flow shop* via simulação (continua...)

Autores	Nº centros de trabalho	Tipos de itens	Real ou Hipotético	Simulador / linguagem de simulação	Sistemas comparados	Medidas de desempenho	Demais configurações	Objetivo	Publicação
Iucksch (2005)	12	1	Real	ProModel	Empurrado, Kanban e CONWIP	Quantidade total produzida, inventário em processo e tempo de ciclo.	Varição de demanda e quantidade mínima de cartões.	Analisar através de simulação computacional o processo produtivo existente de uma empresa industrial, para possibilitar o balanceamento do fluxo produtivo e escolha de um método de gestão de produção.	Universidade Federal do Rio Gande do Sul
Steele <i>et al.</i> (2005)	10	10	Real	Não especificado	MRP e DBR	Estoque total, <i>lead time</i> e utilização do recurso criticamente restritivo.	Precisão de tempo, divisão de lote, método para dimensionamento de estoque de componentes, tempo de <i>setup</i> , incerteza do processo e demanda do consumidor.	Conduzir experimentos baseados em simulação para prover comparações formais entre os sistemas DBR e MRP em uma companhia de manufatura de rolamentos que se encontra na transição do sistema MRP para o DBR.	International Journal of Production Research
Fernandes (2007)	3	1	Hipotético	Arena	MRP, POLCA, gPOLCA	Taxa de saída e WIP.	Número de cartões e mix de produtos padronizado e não padronizado.	Aprofundar o conhecimento acerca do funcionamento dos mecanismos de CAP baseados em WLC e estabelecer orientações práticas para a seleção de mecanismos adequados a situações concretas e particulares de produção.	Universidade do Minho
Cheraghi, Dadashzadeh e Soppin (2008)	9	2	Hipotético	Não especificado	Empurrado, Puxado, Híbrido Empurrado-Puxado, Híbrido Puxado-Empurrado, JIT, CONWIP e TOC	WIP e <i>throughput</i> .	Tamanho do lote, taxa de chegada, tempo entre chegadas e tipo de manutenção.	Analisar comparativamente sete diferentes sistemas de controle da produção, via simulação computacional, considerando configurações de fábrica complexas.	Journal of Business & Economics Research
Jodlbauer e Huber (2008)	6	2	Hipotético	eM-Plant	MRP, Kanban, CONWIP e DBR	Nível de serviço e WIP.	Falha de máquina, <i>setup</i> , suprimento suficiente de matéria-prima, estrutura do produto padronizado.	Investigar MRP, Kanban, CONWIP e DBR sob condições estocásticas em um sistema de produção multi-item e multi-nível.	International Journal of Production Research

Quadro 4.1 – Trabalhos que relacionam um ou mais SCO em um ambiente *flow shop* via simulação (...continuação)

Autores	Nº centros de trabalho	Tipos de itens	Real ou Hipotético	Simulador / linguagem de simulação	Sistemas comparados	Medidas de desempenho	Demais configurações	Objetivo	Publicação
MacDonald e Gunn (2008)	3	2	Hipotético	PACSIM	Kanban, CONWIP, PAC (<i>Production Authorization Card</i>)	Estoque e pedidos atrasados.	Tamanho do estoque intermediário, regras de prioridade na produção (FIFO e o mais velho primeiro) e falha de máquina.	Discutir um framework para analisar sistemas de controle de manufatura.	Winter Simulation Conference
Ghrayeb, Phojanamongkolkij e Tan (2009)	7	120	Real	Arena (SIMAN)	Empurrado, puxado e híbrido empurrado/puxado	Custo de manutenção de estoque e custo do <i>leadtime</i> de entrega.	Suprimento suficiente de matéria-prima.	Elaborar um modelo híbrido empurrado/puxado cuja função objetivo é minimizar a soma do custo da manutenção de estoque e custo do <i>leadtime</i> de entrega. Além disso, elaborar um modelo de simulação de eventos discretos para avaliar a função objetivo para cada cromossomo do algoritmo genético.	Journal of Intelligent Manufacturing
Khojasteh-Ghamari (2009)	20	1	Hipotético	Não especificado	Kanban e CONWIP	Taxa de <i>throughput</i> , WIP total médio, WIP médio.	Número de cartões e falhas de máquina.	Verificar se o kanban supera o CONWIP ao optar por uma boa distribuição de cartões, considerando o papel da distribuição de cartões em sistemas de montagem.	Journal of Intelligent Manufacturing
Wang, Cao e Kong (2009)	12	1	Hipotético	WITNESS	CONWIP, TBC (CONWIP/Pull) e TOC baseado em Kanban/CONWIP	Tempo médio de espera das ordens, WIP, taxa de operação, saídas do sistema e taxa de saída.	Gargalo, estoque intermediário, regras de programação e número de cartões.	Propor um sistema híbrido Kanban/CONWIP, que combina as vantagens das estratégias de controle do CONWIP e Kanban, bem como a teoria das restrições TOC.	IEEE International Conference on Intelligent Computing and Intelligent Systems

4.3 Objetivos e principais resultados dos trabalhos analisados

Nesta seção há a apresentação dos objetivos e principais resultados alcançados nos trabalhos analisados que comparavam SCO em ambiente *flow shop*, com uso de simulação em alguma etapa da pesquisa, como exposto a seguir.

Krajewski *et al.* (1987) avaliaram se o sistema *kanban* pode ser bem executado nos ambientes produtivos de empresas dos EUA e, também, avaliaram quais os fatores em um ambiente de produção têm maior impacto no desempenho, independente de seu sistema em uso. Dentre os sistemas comparados, ROP-diário (*Daily reorder point system*) e *kanban* apresentaram resultados semelhantes. O *kanban* apresentou aumento da necessidade de trabalho em 44%, comparado com o ROP-semanal e diminuiu o estoque em 9%. ROP-semanal apresentou o melhor serviço ao cliente, seguido do *kanban*, ROP-diário e do MRP. O MRP proporcionou menores necessidades de trabalho (horas por semana), seguido do ROP-semanal, *kanban* e ROP-diário. Quanto aos níveis de estoque, o ROP-diário apresentou menores valores, seguido do *kanban*, do MRP e do ROP-semanal. Verificou-se, também, que reduzir tempo de *setup* e tamanhos de lotes foi o modo mais efetivo para reduzir níveis de estoque e melhorar o serviço ao cliente. Fatores operacionais que possuem particular importância são as taxas de produtividade e flexibilidade do trabalhador. Grau de padronização dos produtos e a estrutura dos produtos também são fatores de alto impacto. Menos importantes foram a imprecisão dos estoques, falhas dos equipamentos e confiabilidade do fornecedor. Tais resultados sugerem que a seleção de um sistema de produção/estoque pode ser menos importante do que a melhoria do próprio ambiente de fabricação.

Sarker e Fitzsimmons (1989) investigaram os efeitos das variabilidades no desempenho dos sistemas puxados e empurrados e como o gestor pode decidir qual técnica de produção adotar. Verificaram que a eficiência de um sistema puxado é significativamente menor que de um sistema empurrado. Como o coeficiente de variação do tempo de operação de um estágio aumenta, a diferença de eficiência se torna mais acentuada, mas a eficiência ou a taxa de produção dos sistemas puxados cai, quase exponencialmente, quando o coeficiente de variação dos tempos de processamento aumenta.

Assim como o tempo médio do comprimento da fila de um produto WIP de uma estação foi reduzido, o tempo médio do comprimento da fila do cartão *kanban* aumentou. No entanto, o comprimento da fila do produto WIP decresceu à medida que o produto passou

para o final da estação e o tempo médio do comprimento da fila do cartão *kanban* aumentou rumo ao final da linha.

As saídas diárias, bem como o WIP total em sistemas empurrados foram ambos superiores que as saídas e WIP total nos sistemas puxados para qualquer coeficiente de variação do tempo de processamento. Também foi revelado que em um sistema puxado as saídas decrescem e o WIP total aumenta à medida que o coeficiente de variação dos tempos de processamento dos estágios aumenta.

A utilização de todas as máquinas ao longo da linha manteve-se praticamente constante a um menor coeficiente de variação do tempo de processamento. A utilização das máquinas em um sistema puxado foi significativamente menor que em um sistema empurrado tanto com quanto sem quebras de máquinas.

O sistema puxado foi sempre melhor com WIP mínimo, mas por outro lado, foi menos eficiente do que sistema empurrado, especialmente com altos coeficientes de variação. Portanto, menor variabilidade nos tempos de operação e ainda na alocação de carga de trabalho ao longo da linha é aconselhável para conseguir melhor taxa de saídas em sistemas puxados.

Ramsay, Brown e Tabibzadeh (1990) testaram a aplicabilidade do MRP, do *kanban* e do OPT sob diferentes circunstâncias, por meio de modelos de simulação computacional. O OPT apresentou melhor desempenho do que os demais sistemas simulados, mas as conclusões foram limitadas, pois em algumas comparações a simulação não alcançou o estado estável.

Spearman, Woodruff e Hopp (1990) descreveram um novo sistema puxado CONWIP e expuseram vantagens práticas deste sistema sobre sistemas empurrados e puxados. O CONWIP apresentou uma superioridade quanto ao controle do WIP em processo comparado ao sistema empurrado e não quanto à redução do nível de estoque em processo. O CONWIP apresentou-se mais fácil de controlar. A quantidade ótima de liberação para o sistema empurrado foi de 19 trabalhos e o nível WIP ótimo para o sistema CONWIP foi 51 trabalhos. O sistema empurrado teve uma média de 48 trabalhos, que é na verdade um pouco menor do que o WIP constante no controle ótimo do sistema CONWIP. O CONWIP também apresentou maiores lucros.

Cook (1994) comparou os sistemas TOC, JIT e tradicional com uso de simulação computacional. A filosofia tradicional de manufatura não proveu vantagens sobre a TOC ou sobre o JIT. Além disso, TOC superou JIT em um conjunto crítico de medidas de desempenho. TOC produziu uma quantidade significativamente maior de produtos do que o

JIT. Também produziu bens com menor desvio padrão do tempo de fluxo e, às vezes, teve maiores tempos de fluxo e estoque WIP. Quando TOC teve baixa quantidade de estoque em seu sistema, ele superou JIT sob quaisquer circunstâncias e em todas as medidas de desempenho do sistema.

Duclos e Spencer (1995) refinaram e esclareceram os conceitos sobre gerenciamento da programação de operações, apresentando os resultados de uma simulação baseada em dados empíricos comparando TOC com um sistema MRP em um *flow shop*. DBR apresentou resultados significativamente melhores do que os métodos MRP utilizados na fábrica. Quando comparados às operações MRP e DBR, utilização da máquina e *throughput* foram significativamente diferentes para todos os níveis de variabilidade. O uso do DBR melhorou o desempenho global por meio da melhoria da utilização da operação gargalo. O MODMRP (*Buffer-modified MRP* - MRP modificado no estoque amortizador) revelou como os mecanismos DBR podem impactar no desempenho bem sucedido do ambiente de produção. O DBR apresentou melhor *throughput* para todos os níveis de variabilidade. O MRP apresentou o segundo melhor *throughput* para situação de não variabilidade, seguido do MODMRP para todos os níveis de variabilidade. O desempenho do MRP foi inferior ao DBR e ao MODMRP quando houve presença de variabilidade nas operações. Quanto ao estoque médio no sistema, o MRP apresentou menores níveis quando há variabilidade, seguido do MODMRP e do DBR. Faltas de estoque foram detectadas somente no MRP para determinados níveis de variabilidade.

Chakravorty e Atwater (1996) estudaram, via simulação, as taxas de saída de uma linha balanceada, de uma linha JIT e de uma linha TOC. Observaram que as linhas TOC são mais produtivas do que as linhas JIT e balanceada em situações de níveis relativamente baixos de estoque total do sistema. Linhas TOC conseguiram o nível máximo de saídas com níveis muito menores de estoque no sistema que as linhas JIT. Com estoque suficiente, a linha JIT produziu mais que as linhas TOC e balanceada.

Além disso, as linhas JIT tiveram melhor desempenho quando a variabilidade no sistema foi baixa. As linhas projetadas de acordo com os princípios TOC foram menos afetadas pela variabilidade dentro do sistema do que as linhas balanceada ou JIT.

Gstettner e Kuhn (1996) compararam dois sistemas puxados de controle da produção quanto ao *throughput* e WIP. *Kanban* foi mais flexível para atingir determinado objetivo que o CONWIP. Além do número absoluto de cartões, outro parâmetro que influenciou o desempenho foi a distribuição de cartões. Verificou-se que ao selecionar uma

distribuição de cartões favorável, o sistema *kanban* atingiu uma taxa de produção com menos WIP do que no sistema CONWIP.

Bonvik, Couch e Gershwin (1997) estudaram o desempenho do *kanban*, *minimal blocking*, estoque-base, CONWIP e TBC (*kanban*-CONWIP) em uma linha de produção de itens para uma linha de montagem automobilística. As melhores escolhas de parâmetros para a política híbrida diminuíram os estoques de 10% a 20% sobre a melhor política *kanban*, enquanto mantiveram os mesmos níveis de serviço. A diferença de estoque cresceu à medida que as demandas de nível de serviço cresceram. O desempenho do estoque-base e do CONWIP foi menor comparado ao desempenho do *kanban* e da política híbrida. O CONWIP e o TBC apresentaram melhores respostas às mudanças na taxa de demanda. O *minimal blocking* tem maior *throughput* comparado ao *kanban*, mas atinge maiores estoques para os mesmos tamanhos da área de estocagem.

Huang, Wang e Ip (1998a) introduziram o estudo de simulação de aplicação do CONWIP em um ambiente de manufatura semi-contínua (uma usina de laminação a frio). Os resultados mostraram que o CONWIP é um sistema de controle da produção efetivo em manufatura semi-contínua. Pode reduzir o WIP total, estoque médio e custos médios de estoque, enquanto assegura altas taxas de *throughput* e de utilização média das máquinas.

Huang, Wang e Ip (1998b) compararam, por meio de uma análise de simulação, três sistemas de controle (MRP, *kanban* e CONWIP) implementados em um ambiente de manufatura semi-contínua: uma usina de laminação a frio. Os resultados da simulação mostram que o CONWIP foi o mais eficiente dos sistemas analisados, apresentando melhores resultados quanto ao WIP total, estoque médio e custo médio. O *kanban* apresentou o segundo melhor resultado quanto a essas medidas de desempenho. No que tange a utilização das máquinas, o MRP obteve o melhor resultado, seguido do CONWIP e do *kanban*. O *throughput* foi idêntico para os três sistemas.

Takahashi e Nakamura (1998) formularam um modelo matemático para cada alternativa de sistema, explicaram as propriedades estruturais dos modelos, analisaram e compararam os desempenhos dos modelos por meio de simulação. Os sistemas de *kanban* puro e simultâneo foram os sistemas mais eficientes quanto à manutenção de menor WIP total médio, confrontado ao tempo médio de atendimento ao consumidor.

Gaury, Pierreval e Kleijnen (2000) propuseram uma nova abordagem que permita seleções de estratégias de controle *kanban*, CONWIP e *kanban*/CONWIP híbrido, e a determinação dos valores dos respectivos parâmetros, para otimizar um dado desempenho para um dado sistema de produção. Os resultados mostraram que as melhores estratégias

foram sistemas híbridos simplificados. O desempenho de tais sistemas híbridos simplificados foi dado pelo controle integral CONWIP e o uso combinado do controle local *kanban* melhorou ainda mais o desempenho.

Yang (2000) comparou os sistemas *kanban* de cartão único, *kanban* de cartão duplo e CONWIP. CONWIP apresentou os menores tempo médio de espera do cliente e WIP total. Ademais, os resultados obtidos contradisseram estudos anteriores que apontavam que o *kanban* de cartão duplo possui melhor desempenho que o *kanban* de cartão único. Também, verificou-se que se transferirem imediatamente os contenedores repostos para as estações a jusante, aumentando o número de cartões utilizados e reduzindo o ciclo de retirada, há a redução significativa do tempo médio de espera do consumidor.

Marek, Elkins e Smith (2001) apresentaram uma visão geral de modelagem e controle, via simulação com ARENA/SIMAN, dos sistemas seriais puxados *kanban* e CONWIP. O sistema *kanban* manteve um controle mais rígido do WIP do sistema por meio de um controle de cartão único em cada estação de trabalho, enquanto o CONWIP apresentou maior facilidade de implementação e ajuste, uma vez que apenas uma configuração de sistema de cartões é usada para gerir o WIP do sistema.

Paternina-Arboleda e Das (2001) desenvolveram uma metodologia que, para um dado sistema, encontre uma política de controle dinâmica via agentes inteligentes. As políticas de controle propostas, baseadas em RL e BBC, apresentaram melhores resultados que as demais políticas para diferentes processos de demanda. Elas se mostraram mais aprendizes e ágeis na reação às mudanças que afetam o sistema, o que resultou em menores WIP e custo de WIP. O híbrido e o EKCS, apesar de terem menores tamanhos de estoque nas estações internas, acumulam mais estoque na última estação, o que talvez gerasse maiores custos. Entretanto, o EKCS ainda apresentou-se melhor que o TBC. O *kanban* apresentou maior nível médio de WIP e, conseqüentemente, maior custo.

Gilland (2002) forneceu ideia sobre qual política oferece melhor desempenho, e como a escolha de parâmetros afetam o desempenho de uma dada política. Demonstrou-se que as regras baseadas em gargalos possuem a habilidade de adquirir menores níveis médios de WIP e com maiores taxas de saída. Uma vantagem do CONWIP é que ele garante a manutenção do(s) gargalo(s) no seu domínio de controle.

Krishnamurthy (2002) estabeleceu uma metodologia para avaliação de desempenho de estratégias de controle de materiais para sistemas de manufatura. O CONWIP apresentou melhor desempenho do que os sistemas puxados puros. Os longos *loops* do CONWIP resultaram em menores WIPs. Para valores mais altos de *throughput*, a

flexibilidade dos longos *loops* permitiu superar os sistemas puxado e empurrado. Entretanto, o CONWIP é um sistema puxado e para menores valores de *throughput*, o efeito do WIP é significativo. CONWIP H e POLCA exigiram menos estoques por toda gama de valores de *throughput*, comparados aos sistemas puxados e empurrados.

Takahashi e Nakamura (2002) compararam um sistema *kanban* reativo com um sistema CONWIP reativo sob condições de mudanças instáveis na demanda, utilizando experimentos de simulação. O sistema *kanban* reativo demonstrou-se mais efetivo para reagir a mudanças instáveis na demanda do que o sistema reativo CONWIP. No entanto, ambos os sistemas podem reagir a mudanças instáveis na demanda e manter o tempo médio da demanda em menores níveis do que o exigido. O WIP médio total no *kanban* reativo foi muito menor do que no *kanban* tradicional. Já o CONWIP reativo apresentou maiores ou quase iguais níveis de WIP do que no CONWIP tradicional.

Takahashi (2003) analisou e comparou o desempenho de sistemas *kanban* reativos, baseados em controle gráfico e em estoque. Além disso, comparou o desempenho desses sistemas com o novo sistema proposto baseado em estoque. Os sistemas baseados em controle gráfico e em estoques minimizaram o WIP total médio e o tempo médio de espera. Identificou-se que os sistemas estudados são mais robustos quanto a mudanças inesperadas na demanda, sendo que o baseado em controle gráfico é o mais robusto dos três sistemas testados.

Geraghty e Heavey (2004) compararam a política de controle Híbrido Empurrado/Puxado (HPP) com a política de controle CONWIP. Os desempenhos do HPP e do TBC foram idênticos para todos os critérios analisados, tanto na situação de WIP dinâmico quanto no WIP estático.

Krishnamurthy, Suri e Vernon (2004) analisaram o desempenho do sistema sob diferente gama de produtos e observaram que em certos ambientes com antecipação de informação de demanda, o *kanban* pode causar ineficiências significativas. Para *mixes* de produtos heterogêneos, o MRP garantiu melhor desempenho com menos estoques do que o *kanban*. Ainda, se a alocação de *kanbans* não for definida com cuidado, apesar de haver estoques elevados no sistema, pode haver grandes atrasos médios de ordens atrasadas e baixos níveis de serviço.

Lucksch (2005) analisou, por meio de simulação computacional, o processo produtivo existente de uma empresa industrial, para possibilitar o balanceamento do fluxo produtivo e escolha de um método de gestão de produção. Em todos os cenários simulados, para demanda de 04, 08 e 12 peças diárias, evidenciou-se a supremacia do *kanban* e do

CONWIP comparado ao sistema empurrado. Quando comparados os dois sistemas puxados, observou-se vantagem do CONWIP sobre o *kanban* quanto às medidas de desempenho adotadas para o cenário de demanda de 12 peças. Para os cenários de 04 e 08 peças, o CONWIP ainda apontou melhor desempenho nas medidas, respectivamente, de inventário e produção total, e inventário e tempo de ciclo.

Steele *et al.* (2005) conduziram experimentos baseados em simulação para prover comparações formais entre os sistemas DBR e MRP em uma companhia de manufatura de rolamentos que se encontra na transição do sistema MRP para o DBR. Mesmo que os sistemas MRP e DBR posicionassem o estoque diferentemente e proporcionassem diferentes dinâmicas de resposta à demanda do consumidor, há várias políticas operacionais que poderiam ser implementadas em qualquer um dos sistemas. Enquanto o desempenho do DBR no modelo de simulação foi claramente superior a implementação nominal do sistema MRP, a adoção de políticas modificadas com base nos princípios do DBR pode reduzir significativamente essas diferenças de desempenho, mesmo considerando as restrições estruturais dos sistemas MRP.

Fernandes (2007) aprofundou o conhecimento acerca do funcionamento dos mecanismos de controle das atividades de produção baseados em WLC (*workload control* – controle pela carga de trabalho) e estabeleceu orientações práticas para a seleção de mecanismos adequados a situações concretas e particulares de produção. O POLCA e o gPOLCA possuíram um desempenho superior ao mecanismo MRP. O WIP requerido para alcançar determinada taxa de saída tendeu a ser mais elevado no MRP, particularmente para níveis elevados de taxa de saída. O gPOLCA foi o sistema que possuiu o melhor desempenho, comparado aos demais sistemas analisados.

Cheraghi, Dadashzadeh e Soppin (2008) analisaram comparativamente sete diferentes sistemas de controle da produção, via simulação computacional, considerando configurações de fábrica complexas. Embora o sistema puxado seja geralmente considerado como a melhor estratégia de manufatura para controlar o WIP do sistema, o sistema empurrado demonstrou melhor desempenho sob certos parâmetros de entrada. O tamanho do lote mostrou efeito significativo no desempenho dos sistemas puxado e JIT. Sob baixas taxas de chegada e altos tempos entre chegadas, sistemas puxados operaram com maior WIP do que outros sistemas. À medida que o tamanho do lote foi aumentado, o WIP aumentou para os sistemas puxados e JIT.

Verificou-se, também, que sistemas empurrados e TOC apresentaram maiores variações de WIP quando considerada a manutenção preventiva. Manutenção reativa foi

preferida para sistemas empurrados e TOC para conseguir maiores *throughputs* do sistema, mas à custa de maiores WIPs. Sistemas puxados e JIT mostraram maiores variações quanto ao *throughput* para manutenção reativa e variações muito menores de WIP nessa condição. O desempenho do CONWIP seguiu a tendência de sistemas empurrados até alcançar certo WIP, após isso, seguiu a tendência de sistemas puxados.

Jodlbauer e Huber (2008) investigaram MRP, *kanban*, CONWIP e DBR sob condições estocásticas em um sistema de produção multi-item e multinível. O CONWIP superou os demais sistemas quanto ao desempenho do nível de serviço e WIP, no qual batalha para manter essa vantagem sob condições dinâmicas. Entretanto, o MRP apresentou grande estabilidade quanto aos parâmetros analisados. A maior vantagem do CONWIP e do DBR sobre o MRP e *kanban* é o menor número de parâmetros dos sistemas que devem ser ajustados.

MacDonald e Gunn (2008) discutiram um *framework* para analisar sistemas de controle de manufatura. O PAC (*Production Authorization Card*) obteve melhores resultados, seguido do CONWIP e do *kanban*. Houve menor necessidade de formação de estoques para determinada porcentagem de atraso na entrega de pedidos de clientes, comparado aos demais sistemas.

Ghrayeb, Phojanamongkolkij e Tan (2009) elaboraram um modelo híbrido empurrado/puxado cuja função objetivo é minimizar a soma do custo da manutenção de estoque e custo do *leadtime* de entrega. Além disso, elaboraram um modelo de simulação de eventos discretos para avaliar a função objetivo para cada cromossomo do algoritmo genético. Ao comparar o sistema empurrado com o puxado, o puxado possuiu melhor desempenho somente quando a razão de custo foi pequena, enquanto possuiu melhor desempenho somente quando a razão foi grande. A empresa analisada economizaria significativamente se trocasse o atual sistema empurrado pelo sistema híbrido.

Khojasteh-Ghamari (2009) verificou se o *kanban* supera o CONWIP ao optar por uma boa distribuição de cartões, considerando o papel da distribuição de cartões em sistemas de montagem. O *kanban* apresentou-se mais flexível para o sistema de montagem que o CONWIP. Em alguns casos, se o número de cartões *kanban* em cada estação de manufatura/montagem possui configuração ótima, o sistema *kanban* supera o CONWIP com WIP médio mais baixo e o mesmo nível de *throughput*.

Wang, Cao e Kong (2009) propuseram um sistema híbrido *Kanban/CONWIP*, que combina as vantagens das estratégias de controle do CONWIP e *Kanban*, bem como a teoria das restrições TOC. O sistema híbrido proposto obteve melhor desempenho em todas as

métricas consideradas, sendo que o sistema CONWIP/*Pull* obteve o segundo melhor resultado seguido do CONWIP.

4.4 Verificação das formas de análise e resultados dos trabalhos que possuem algum SCO compatível com os estudados na tese

Nesta seção é exposto o detalhamento das formas de análise realizadas pelos trabalhos que estudaram algum SCO compatível com os pesquisados nesta tese e aprofundamento dos principais resultados adquiridos com estas análises para os sistemas *Kanban*, CONWIP e/ou TBC. O intuito aqui é aprofundar o conhecimento na área e identificar lacunas a serem preenchidas com esta tese.

Como pode ser observado no Quadro 4.2, os trabalhos que analisaram em algum momento os sistemas foco desta pesquisa foram de Bonvik, Couch e Gershwin (1997), Gaury, Pierreval e Kleijnen (2000) e Paternina-Arboleda e Das (2001). As formas de análise realizadas e os principais resultados encontrados também estão no referido quadro.

Bonvik, Couch e Gershwin (1997) mostraram, graficamente, e discutiram as seguintes ponderações: i) melhor configuração do tamanho dos *buffers* e do nível de estoque-base para cada sistema; ii) *tradeoff* entre nível de serviço e estoque para o *Kanban* e TBC; iii) localização dos estoques, confrontando os níveis médios e o número do buffer; iv) evolução da variabilidade dos tempos entre cargas de eventos, comparando o desvio padrão com as máquinas presentes no sistema simulado; v) comportamento dos estoques de produtos acabados, de WIP e do nível do *Buffer 3* levando em conta a mudança na taxa de demanda.

Dentre os resultados encontrados pelos autores supracitados, o TBC obteve melhor relação nível de serviço/estoque do que o *kanban*, considerando o cenário de taxa de demanda constante. Quanto ao posicionamento do estoque, o *kanban* manteve mais estoque internamente a linha do que as outras políticas. O CONWIP e o TBC superaram vastamente o *kanban* quanto à variabilidade do tempo entre cargas de eventos. Quando houve mudança na taxa de demanda ao longo da simulação, o *kanban* apresentou o mais alto estoque total em todo o período. Os níveis de WIP foram mais variáveis nos períodos de alta demanda que nos períodos de baixa demanda.

Gaury, Pierreval e Kleijnen (2000) utilizaram algoritmo evolucionário para a otimização do número de cartões *kanban* e CONWIP para adquirir o menor WIP para determinado nível de serviço. Os modelos do *kanban*, do CONWIP e do TBC foram

elaborados e simulados por meio de um modelo genérico desenvolvido para gerarem os dados para a otimização.

Segundo os autores, as melhores soluções obtidas, por meio do procedimento de otimização, foram três estratégias simplificadas híbridas. Os três sistemas de controle apresentaram o mesmo comportamento em termo de alocação de estoque médio ao longo da linha: equilibrado no meio, um pouco maior no início e alto no final.

Paternina-Arboleda e Das (2001) fizeram sua pesquisa com base nas configurações recomendadas por Bonvik, Couch e Gershwin (1997). Consideraram cenários com taxas de demanda constante e segundo a distribuição Poisson. Os sistemas *kanban*, CONWIP e TBC foram simulados somente no cenário de demanda constante. O modelo de simulação foi usado como um veículo para implementação do algoritmo SMART a fim de obter políticas dinâmicas de controle.

Os principais resultados obtidos pelos autores, para os sistemas compatíveis com os estudados nessa tese, foram: o TBC obteve menor WIP médio, seguido do CONWIP e do *kanban*, ao se considerar a taxa de demanda constante e um nível de serviço de pelo menos 99,9%. Quanto à distribuição do WIP médio pelo sistema analisado, houve maior concentração de WIP na última estação de trabalho para todos, sendo que o *kanban* obteve maior concentração também na terceira estação. Ainda, o *kanban* obteve maior custo médio ponderado do WIP por estação, seguido do CONWIP e do TBC.

Quadro 4.2 – Aprofundamento da análise dos trabalhos sobre *Kanban*, CONWIP e/ou TBC (continua...)

Autores	Sistema compatível com a tese	Forma de análise realizada	Principais resultados para o sistema compatível
Krajewski <i>et al.</i> (1987)	<i>Kanban</i>	Foram confrontados, em uma tabela, os resultados obtidos em dois experimentos, o primeiro com condições mais favoráveis (comparação de somente 2 sistemas) e o segundo com aplicação de todos os sistemas analisados a um ambiente mais desfavorável do que o primeiro.	O <i>kanban</i> apresentou melhor nível de serviço ao consumidor no primeiro experimento. No segundo experimento, o <i>kanban</i> não obteve os melhores resultados.
Ramsay, Brown e Tabibzadeh (1990)	<i>Kanban</i>	Analisou graficamente a quantidade produzida com o passar do tempo simulado conforme regras de produção puxada, empurrada e de contenção.	A maior quantidade dos itens que compõem o produto final foi produzida nas primeiras cinco unidades de tempo, considerando um horizonte de 10 unidades de tempo.
Spearman, Woodruff e Hopp (1990)	CONWIP	Foram discutidas as seguintes análises gráficas: lucro por replicação, e lucro versus controlabilidade (valor do controle como uma fração do ótimo).	O nível ótimo de WIP para o sistema CONWIP foi 51 trabalhos, sendo que apresentou maior significância econômica. Isso se deve pela melhor controlabilidade.
Gstettner e Kuhn (1996)	<i>Kanban</i> e CONWIP	Apresentou-se um comparativo, por meio de uma tabela com dados da simulação, dos sistemas <i>Kanban</i> com transferência de material tardia e do CONWIP. Neste foram expostos o WIP por estação de trabalho, WIP total e Taxa de produção. Também, foi efetuado um modelo de otimização com objetivo de minimizar WIP sujeito a determinada taxa de produção (para uma linha balanceada) e aplicação de heurística.	A distribuição do WIP em cada estação de trabalho foi idêntica para o CONWIP, o qual gerou um WIP total um pouco maior e uma taxa de produção um pouco mais baixa que o <i>kanban</i> com transferência de material tardia. Considerando o modelo de otimização, apresentou-se graficamente que determinada taxa de produção pode ser alcançada com menos WIP quando usado o sistema <i>Kanban</i> tanto em uma linha balanceada quanto em uma linha desbalanceada.
Bonvik, Couch e Gershwin (1997)	<i>Kanban</i> , CONWIP e TBC (<i>Kanban</i> -CONWIP)	Por meio de simulação, a melhor configuração do tamanho dos buffers e do nível de estoque-base para cada política de controle, para alcançar os objetivos almejados. Mostrou graficamente o <i>tradeoff</i> entre nível de serviço e estoque para o <i>Kanban</i> e TBC. Determinou graficamente a localização dos estoques, confrontando os níveis médios e o número do buffer. Confrontou graficamente o desvio padrão com as máquinas para mostrar a evolução da variabilidade dos tempos entre cargas de eventos. Comparou graficamente o comportamento dos estoques de produtos acabados, de WIP e do nível do Buffer 3 com o passar do tempo de simulação levando em conta a mudança na taxa de demanda.	O TBC obteve melhor relação nível de serviço/estoque do que o <i>kanban</i> , considerando o cenário de taxa de demanda constante. Quanto ao posicionamento do estoque, o <i>Kanban</i> manteve mais estoque internamente a linha do que as outras políticas. O CONWIP e o TBC superaram vastamente o <i>kanban</i> quanto à variabilidade do tempo entre cargas de eventos. Quando houve mudança na taxa de demanda ao longo da simulação, o <i>kanban</i> apresentou o mais alto estoque total todo o período. Os níveis de WIP foram mais variáveis nos períodos de alta demanda que nos períodos de baixa demanda.

Quadro 4.2 – Aprofundamento da análise dos trabalhos sobre *Kanban*, CONWIP e/ou TBC (continua...)

Autores	Sistema compatível com a tese	Forma de análise realizada	Principais resultados para o sistema compatível
Huang, Wang e Ip (1998a)	CONWIP	Realizou-se uma análise gráfica da taxa de throughput e utilização confrontada com o número de cartões CONWIP. Comparou-se o sistema original com o CONWIP, de forma tabular, considerando quatro cenários com possibilidades de existência ou não de estoque de produtos acabados (EPA) e tamanho de estoque intermediário (EI).	O CONWIP mostrou melhor desempenho em todas as medidas de desempenho analisadas em todos os cenários: considerando EPA e EI; considerando somente EI; considerando somente EPA; desconsiderando ambos EPA e EI.
Huang, Wang e Ip (1998b)	CONWIP e <i>Kanban</i>	A simulação foi feita utilizando linguagem C. Foi realizada uma análise gráfica da taxa de throughput e utilização confrontada com o número de cartões CONWIP. Para o <i>kanban</i> também foi feita a determinação de número de cartões, agora em forma tabular, considerando as mesmas medidas de desempenho adicionando o WIP. Ademais, foi efetuada uma comparação dos sistemas, em uma tabela, que contém todas as medidas de desempenho analisadas na pesquisa.	Considerando a mesma entrada e o mesmo throughput, o CONWIP, comparado ao <i>kanban</i> , apresentou maior utilização e menores estoque e custo.
Takahashi e Nakamura (1998)	<i>Kanban</i> puro, <i>kanban</i> conhecido na literatura e simultâneo	Verificou-se graficamente o <i>trade-off</i> entre o tempo médio de espera do produto demandado com o WIP total médio sob dois níveis de tempo médio de produção e de variância do tempo de produção.	Dentre as alternativas consideradas no trabalho, o <i>kanban</i> puro e o simultâneo foram consideradas as melhores opções quanto a média e a variância do tempo de produção.
Gaury, Pierreval e Kleijnen (2000)	CONWIP, <i>Kanban</i> e Híbrido <i>Kanban</i> /CONWIP (TBC)	Utilizou algoritmo evolucionário para a otimização do número de cartões <i>kanban</i> e CONWIP para adquirir o menor WIP para determinado nível de serviço. Os modelos do <i>kanban</i> , do CONWIP e do TBC foram elaborados e simulados por meio de um modelo genérico desenvolvido para gerarem os dados para a otimização.	As melhores soluções obtidas, por meio do procedimento de otimização, foram três estratégias simplificadas híbridas. Os três sistemas de controle apresentaram o mesmo comportamento em termo de alocação de estoque médio ao longo da linha: equilibrado no meio, um pouco maior no início e alto no final.
Yang (2000)	<i>Kanban</i> de cartão único, <i>Kanban</i> de cartão duplo e CONWIP	Foi feita análise fatorial da variância completa (ANOVA) e comparação por meio do teste de Turkey para examinar interações significativas. Os resultados obtidos para cada medida de desempenho foram apresentados em tabelas e gráficos.	O CONWIP mostrou-se com o melhor desempenho do que os demais sistemas para grande maioria das medidas de desempenho para ciclos de retirada curtos e longos, e políticas de transferência imediata ou periódica. Somente no quesito número de viagens com ciclo de retirada longo e transferência imediata que o <i>kanban</i> de cartão duplo obteve o melhor desempenho do que os outros.

Quadro 4.2 – Aprofundamento da análise dos trabalhos sobre *Kanban*, CONWIP e/ou TBC (continua...)

Autores	Sistema compatível com a tese	Forma de análise realizada	Principais resultados para o sistema compatível
Marek, Elkins e Smith (2001)	<i>Kanban</i> e CONWIP	Usou heurísticas para redução de cartões <i>kanban</i> e de cartões CONWIP. Expôs os dados em tabelas contando tempos médios de filas, total de entradas e total de itens finalizados para cada configuração testada.	<i>Kanban</i> manteve um controle mais estreito do WIP do sistema por meio do cartão individual em cada estação de trabalho (ET) e o CONWIP foi mais fácil de implementar e ajustar, pois somente uma configuração do sistema de cartões é usada para gerenciar o WIP do sistema. O sistema CONWIP precisou de 12 cartões para obter 1.770 ordens finalizadas em 96.000 minutos. Enquanto o número de cartões decresce, o tempo de fila das ordens aumenta e o tempo no sistema reduz e o WIP diminui. O <i>kanban</i> necessitou de um <i>throughput</i> de pelo menos 1.767 ordens completas em 96.000 minutos. Para atingir esta meta, a ET 3 deveria possuir 3 cartões, a ET 4 deveria reduzir o número de cartões para 15 e a ET 2 deveria usar 1 cartão.
Paternina-Arboleda e Das (2001)	<i>Kanban</i> , CONWIP e TBC	Simulou os sistemas com base nas configurações recomendadas por Bonvik et al. (1997), considerando taxas de demanda constante e segundo a distribuição poisson. Os sistemas <i>kanban</i> , CONWIP e TBC foram simulados somente no cenário de demanda constante. O modelo de simulação foi usado como um veículo para implementação do algoritmo SMART a fim de obter políticas dinâmicas de controle.	Considerando a taxa de demanda constante e um nível de serviço de pelo menos 99,9%, o TBC obteve menor WIP médio, seguido do CONWIP e do <i>Kanban</i> . Quanto à distribuição do WIP médio pelo sistema analisado, houve maior concentração de WIP na última estação de trabalho para todos, sendo que o <i>kanban</i> obteve maior concentração também na terceira estação. O <i>kanban</i> obteve maior custo médio ponderado do WIP por estação, seguido do CONWIP e do TBC.
Gilland (2002)	CONWIP	Confrontou graficamente as saídas, em porcentagem da capacidade do gargalo, com o WIP gerado para sistemas com apenas um gargalo e para sistemas com vários gargalos.	CONWIP retém o(s) gargalo(s) do sistema sob seu controle.
Krishnamurthy (2002)	<i>Kanban</i> , CONWIP CNE e CONWIP H	Utilizou em conjunto a análise de modelos de filas, processo semi-Markoviano e aproximação de dois momentos para o parâmetro variabilidade.	CONWIP apresentou melhor desempenho do que os demais sistemas puxados, obtendo menor WIP. O CONWIP H necessitou de menos estoque para todos valores de <i>throughput</i> .

Quadro 4.2 – Aprofundamento da análise dos trabalhos sobre *Kanban*, CONWIP e/ou TBC (continua...)

Autores	Sistema compatível com a tese	Forma de análise realizada	Principais resultados para o sistema compatível
Takahashi e Nakamura (2002)	<i>Kanban</i> e CONWIP	Utilizou o algoritmo de duas fases desenvolvido pelos autores para melhor alocação de estoque intermediário no sistema <i>kanban</i> . Comparou graficamente a influência do tempo médio entre chegadas de demanda com o tempo médio de espera da demanda (wt) e do WIP médio total (twip).	Para o <i>kanban</i> , o wt decresce enquanto que o twip aumenta. Para minimizar o twip enquanto mantém o wt em um nível inferior, o tamanho do estoque intermediário no ponto final de estocagem deve ser alterado para mudar o tempo médio entre chegadas de demanda. À medida que aumenta o tamanho do estoque intermediário, o wt decresce enquanto que o twip aumenta no sistema CONWIP e no <i>kanban</i> .
Geraghty e Heavey (2004)	TBC	Aplicou o algoritmo <i>Simulated Annealing</i> juntamente com a simulação para encontrar estoque ótimo e níveis de estoque de segurança.	O TBC foi considerado uma política ótima conforme proposto por Bonvik et al. (1997) e Hodgson e Wang (1991a, b) e dentre as oito políticas testadas sob níveis de estoque e estoque de segurança ótimos.
Krishnamurthy, Suri e Vernon (2004)	<i>Kanban</i>	Verificou-se o comportamento do sistema com múltiplos produtos com mix de produtos homogêneos e com produtos heterogêneos. Foram apresentados gráficos tridimensionais e bidimensionais.	Para os ambientes considerados, o sistema <i>kanban</i> não obteve melhor desempenho.
Iucksch (2005)	<i>Kanban</i> e CONWIP	Foram realizadas análises de cenários com variação da quantidade de demanda diária. Também, foram feitas análises considerando as mesmas quantidades de demanda diária com quantidade mínima de cartões.	O CONWIP obteve melhor desempenho principalmente após a redução da quantidade de cartões, possuindo um desvio padrão do tempo de ciclo menor. Assim, este balanceou o fluxo produtivo, atendeu à demanda com mínimo estoque em processo e tempo de ciclo de forma melhor que o <i>kanban</i> .
Cheraghi, Dadashzadeh e Soppin (2008)	CONWIP	Houve comparações gráficas dos sistemas analisados confrontando o <i>throughput</i> com o WIP sob uma taxa de chegada de 100, 150, 200 e 250 itens por dia. Também foram feitas as mesmas análises agora considerando tempos entre chegadas (100 s, 250 s e 400 s) e de taxa de chegada (100 itens por dia) de materiais constantes.	Em situações de taxa de chegadas menores, o CONWIP apresentou melhor desempenho com aumento no tamanho do lote, no entanto, esta tendência muda com o aumento da taxa de chegada. CONWIP também opera consideravelmente com menor WIP e apresenta variação mediana do WIP, comparado com os demais, quando a taxa de chegada varia e o tempo entre chegadas é constante.

Quadro 4.2 – Aprofundamento da análise dos trabalhos sobre *Kanban*, CONWIP e/ou TBC (...continuação)

Autores	Sistema compatível com a tese	Forma de análise realizada	Principais resultados para o sistema compatível
Jodlbauer e Huber (2008)	<i>Kanban</i> e CONWIP	Apresentou-se um comparativo gráfico do nível de serviço x WIP sendo que os resultados foram gerados com uso de algoritmo evolucionário e coeficiente de correlação de Pearson.	O CONWIP possuiu o melhor desempenho (maior nível de serviço alcançado com o mesmo WIP). Já o <i>kanban</i> obteve o menor nível de serviço comparado com os demais sistemas. Ambos os sistemas reagem imediatamente quando há falhas. Exceto para o coeficiente de variação da demanda, uma redução na variabilidade da linha de produção melhora o desempenho do CONWIP. Uma grande vantagem do CONWIP sobre o <i>kanban</i> é o baixo número de parâmetros que devem ser ajustados.
MacDonald e Gunn (2008)	<i>Kanban</i> e CONWIP	Mostrou-se graficamente os resultados obtidos com uso do algoritmo <i>Simulated Annealing</i> aplicado ao metamodelo desenvolvido para encontrar as políticas com as melhores combinações para estoque médio total e porcentual de nível de serviço.	O CONWIP apresentou-se mais próximo do ótimo e mais fácil de implementar do que o <i>kanban</i> . Assim, para determinada porcentagem de atraso na entrega, o CONWIP gerou menos estoques do que o <i>kanban</i> .
Khojasteh-Ghamari (2009)	<i>Kanban</i> e CONWIP	Os métodos de liberação de cartões DCB (<i>discrete-card-buffer</i>) e SCB (<i>shared-card-buffer</i>) para o CONWIP foram testados. Ainda, foram analisados quatro casos: i) linha de montagem suprida por duas linhas de produção com 3 estações de trabalho cada; ii) somente uma estação em cada linha de cada estágio; iii) duas estações em cada linha dos estágios 1 e 2, com somente um estágio de montagem no estágio final; e iv) 3 estações em cada linha dos estágios 1 e 2, com duas estações no estágio final.	O método DCB foi melhor para liberação de cartões CONWIP, propiciando menor WIP médio e alta taxa de <i>throughput</i> , com mesmo número de cartões circulando. O <i>throughput</i> do <i>kanban</i> e do CONWIP foram idênticos em todos os casos, pois ambos sistemas tiveram a mesma distribuição de tempos de processamento e condições iniciais. O <i>kanban</i> apresentou melhor desempenho que o CONWIP com um menor WIP.
Wang, Cao e Kong (2009)	CONWIP e TBC (CONWIP/Pull)	Analisou-se o desempenho do sistema em três situações: i) otimização do número de cartões para o sistema híbrido proposto; ii) otimização do sistema proposto sob diferentes gargalos e regras de programação; e iii) comparação do desempenho de todos os sistemas analisados. Para a otimização, utilizou-se algoritmo <i>simulated annealing</i> .	Os sistemas CONWIP e TBC não obtiveram o melhor desempenho, no entanto, o TBC foi o segundo melhor sistema para todas as medidas consideradas.

4.5 Considerações Finais

Apresentou-se, neste capítulo, uma revisão de literatura com intuito de identificar os trabalhos que comparam sistemas de coordenação de ordens por meio de simulação de ambientes *flow shop*. Por meio desta revisão, efetuou-se um sistema de classificação dos trabalhos contendo dez categorias, sendo estas: autores e data de publicação; número de centros de trabalho; natureza dos dados utilizados; medidas de desempenho; sistemas comparados; tipos de itens simulados; simulador ou linguagem de simulação utilizada; demais configurações; objetivo e publicação.

Alguns pontos verificados que merecem destaque são:

- A maioria dos casos analisados é hipotética, possuía a modelagem, em ordem decrescente de frequência, de 5 (8 casos), 4 (5 casos), 10 (5 casos) e 3 (4 casos) centros de trabalho, 1 (17 casos) e 2 (7 casos) tipo de itens, e possuem vínculo internacional de publicação (30 trabalhos).
- O sistema *kanban* e suas variações foram estudados 21 vezes, representando 22,34% de presença nos 94 casos de estudo dos sistemas citados nos trabalhos analisados. O CONWIP e suas variações foram o segundo sistema mais estudado, possuindo uma frequência de 17 vezes (18,09%), seguido do MRP, que foi analisado 10 vezes (10,64%). O TBC e os sistemas empurrados foram estudados cinco vezes cada um (5,32%), seguido do DBR com frequência de quatro casos (4,26%) e dos sistemas puxados, JIT, TOC, POLCA e PFB com três aparições cada, ou seja, 3,19%. Já, os sistemas estoque-base, ROP, híbrido empurrado-puxado foram estudados duas vezes cada um (2,13%) e os sistemas OPT, *minimal blocking*, híbrido puxado-empurrado, linha balanceada, PAC, sistema tradicional, EKCS, RL, BBC, *clockwork* e HPP possuíram a frequência de uma vez cada, representando 1,06%.
- Ao considerar apenas os artigos que estudaram um ou mais dos sistemas foco dessa tese (23 artigos), 43,48% (10 artigos) compararam os sistema *kanban* com CONWIP, como pode ser observado no Quadro 4.3. Somente três artigos analisaram os três sistemas (13,04%), sendo que dois desses enfatizaram a aplicação de algoritmos para otimização em conjunto com o estudo de simulação.

Quadro 4.3 – Comparações realizadas em pesquisas com sistemas compatíveis com a tese

Comparações realizadas dos sistemas compatíveis	Frequência	%
Kanban	4	17,39%
CONWIP	4	17,39%
TBC	1	4,35%
Kanban x CONWIP	10	43,48%
CONWIP x TBC	1	4,35%
Kanban x CONWIP x TBC	3	13,04%

- Com relação às medidas de desempenho, observou-se que o *WIP*, *throughput*, estoque total e nível de serviço foram mais utilizados, correspondendo respectivamente às frequências de 23 e as demais 6 vezes. As demais medidas e suas respectivas frequências estão no quadro 4.4.

Quadro 4.4 – Medidas de desempenho utilizadas nos trabalhos e suas respectivas frequências e porcentagens

Medidas de desempenho	Frequência	%	Medidas de desempenho	Frequência	%
Necessidade de trabalho	1	1,23%	Tempo médio de espera do produto demandado	3	3,70%
Estoque total	6	7,41%	Atendimento ao cliente	1	1,23%
Demandas não atendidas	1	1,23%	Movimentação de material	1	1,23%
Eficiência da linha	1	1,23%	Custo médio de WIP	1	1,23%
Comprimento da fila	1	1,23%	Taxa de saída	3	3,70%
Saídas do sistema	4	4,94%	Custo de estoque	2	2,47%
WIP	23	28,40%	Custo de falta	1	1,23%
Utilização da máquina	2	2,47%	Ganho	1	1,23%
Momento de liberação da ordem	2	2,47%	Espera média de ordem atrasada	1	1,23%
Lucro	1	1,23%	Tempo de ciclo	1	1,23%
Controlabilidade	1	1,23%	Lead time	1	1,23%
Tempo de fluxo	1	1,23%	Utilização do recurso criticamente restritivo	1	1,23%
Desvio padrão do tempo de fluxo	1	1,23%	Pedidos atrasados	1	1,23%
Throughput	6	7,41%	Custo do lead time de entrega	1	1,23%
Falta de estoque	1	1,23%	Tempo médio de espera das ordens	1	1,23%
Nível de serviço	6	7,41%	Taxa de operação	1	1,23%
Variabilidade ao longo da linha	1	1,23%			
Custo médio de estoque	1	1,23%	Total	81	100,00%

A contribuição deste capítulo para esta tese é obter embasamento teórico de forma organizada, das principais informações contidas nos trabalhos analisados e, assim, fornecer *insights* para a elaboração desta pesquisa.

CAPÍTULO 5 – MODELAGEM E SIMULAÇÃO DO CENÁRIO ATUAL DA LINHA DE EIXOS TRASEIROS

5.1 Considerações Iniciais

O presente capítulo possui o objetivo de apresentar a modelagem e simulação do cenário atual da linha de eixos traseiros de uma empresa automobilística, para posterior realização de cenários que contemplem os sistemas de coordenação de ordens CONWIP, *kanban* e TBC. Para tanto, são expostos e discutidos os passos considerados para o estudo de simulação segundo Law e Kelton (2000).

Um ponto importante a ser comentado é que, devido à falta de padronização de alguns conceitos na literatura de engenharia de produção, as medidas de desempenho utilizadas e/ou mencionadas em algum momento nos capítulos 5, 6 e 7 seguem as definições:

- Tempo de fluxo (*flow time*): conforme Hopp e Spearman (2008), é também chamado de tempo de ciclo (*cycle time*), tempo médio de ciclo (*average cycle time*), tempo de atravessamento (*throughput time*), tempo de permanência temporária (*sojourn time*). Trata-se do tempo médio de liberação de um trabalho no início do roteamento até que ele atinja um ponto de estoque no fim da rota (ou seja, o tempo que a peça gasta como WIP).
- Estoque intermediário (*intermediate stock*): estoque acumulado entre duas operações interdependentes como um amortecedor contra falhas e desigualdades nas taxas de produção, então reduzindo a necessidade pela sincronização das saídas do sistema. Também conhecido como *decoupling stock* (BUSINESS DICTIONARY, 2012). De acordo com Fusco *et al.* (2003), é o nome geralmente dado ao estoque de submontagem ou matéria-prima disponíveis durante o processo, sendo de difícil dimensionamento e resultando de desbalanceamento entre postos de trabalho.
- Saídas do sistema (*outputs*): conforme Slack, Chambers e Johnston (2002), são bens físicos e/ou serviços produzidos ao final do processo de transformação.
- Utilização dos operadores: a taxa de utilização de um atendente reporta-se à relação entre o seu tempo total ocupado e o tempo total disponível, no caso de “uma fila/um atendente”. Quando se trata do modelo de fila “uma fila/vários atendentes, refere-se à fração média do tempo em que cada servidor está ocupado (PRADO, 2004).
- Tempo de fila: segundo Prado (2004), representa o tempo médio de permanência de uma entidade (pessoas, objetos, entre outros, que receberão processamento) na fila (local de espera).

- *Throughput (TH) ou throughput rate*: segundo Hopp e Spearman (2008), as saídas médias de um processo produtivo (máquina, estação de trabalho, linha, planta) por unidade de tempo (ex. peças por hora).
- *Work in process (WIP)*: o estoque entre os pontos inicial e final de uma rota de um produto. Desde que a rota inicia e finaliza em pontos de estoque, WIP é todo o produto entre, mas não incluindo, o ponto final de estoque (HOPP; SPEARMAN, 2008).
- *Nível de serviço*: fração de todas as demandas que encontram um componente pronto para uso quando ocorre a demanda (BONVIK; COUCH; GERSHWIN, 1997).

Para cumprir o objetivo desse capítulo, seguiu-se a estrutura: i) na seção 5.2 há um breve histórico da empresa estudada; ii) a seção 5.3 traz a formulação do problema e planejamento do estudo; iii) a seção 5.4 possui informações sobre a coleta de dados e definição do modelo; iv) a 5.5 apresenta a validação do modelo conceitual; v) a seção 5.6 contempla a construção do programa computacional e verificação; vi) a seção 5.7 informa sobre a realização de execuções piloto; vii) a 5.8 expõe informações sobre a validação do modelo programado; viii) a seção 5.9 traz o projeto dos experimentos; ix) a seção 5.10 apresenta a realização das execuções de simulação; x) a seção 5.11 possui a análise de resultados; xi) a seção 5.12 informa sobre a documentação e implementação; e, por fim, na seção 5.13 há as considerações finais.

5.2 Breve histórico da empresa estudada

A montadora de veículos pesquisada possui capital nacional e iniciou sua produção e revenda de peças para reposição há mais de dez anos. Está instalada em uma área de 630 mil m² e cerca de 100 mil m² são de área construída. Possui aproximadamente dois mil funcionários em sua planta fabril nacional e aproximadamente 80 funcionários atuando nas áreas administrativa e operacional na unidade de revenda de peças.

Atualmente, de suas dependências saem nove modelos, nos quais quatro são montados e outros cinco modelos são em regime de CBU (*Completely Build Unit* - Unidades Completamente Montadas, ou seja, esses veículos chegam ao Brasil totalmente montados). Produz aproximadamente 40 mil veículos por ano (excluindo CBU).

A empresa registrou um faturamento anual de aproximadamente R\$ 4 bilhões em 2009 e possui uma rede de distribuição composta de 156 revendas completas (vendas de automóveis e serviços).

5.3 Formulação do problema e planejamento do estudo

Nesta etapa, o uso da simulação foi devido à necessidade de simular o cenário atual de uma parte da linha de produção para futuramente fazer cenários com a aplicação de sistemas de coordenação de ordens. Além disso, pretende-se com o modelo simulado obter facilidade na visualização de diferentes cenários e fornecimento de informações rápidas e confiáveis para tomadas de decisões, o que permite analisar o desempenho do sistema e verificar os impactos na produção (tais pontos serão expostos nos capítulos 6 e 7).

Ressalta-se que houve o planejamento do processo, determinando metas para finalização do projeto de simulação e determinando os recursos financeiros, humanos e tecnológicos necessários.

Portanto, o objetivo deste estudo de simulação consistiu em representar o cenário atual de uma parte da linha de produção. Os objetivos específicos foram: i) simular o volume de produção do dia (130 automóveis de uma linha de eixo traseiro, em uma jornada de trabalho de 8,63 horas) com uso do software ARENA; ii) utilizar mão-de-obra e balanceamento disponível atualmente; iii) considerar operações e tempos conforme coleta de dados.

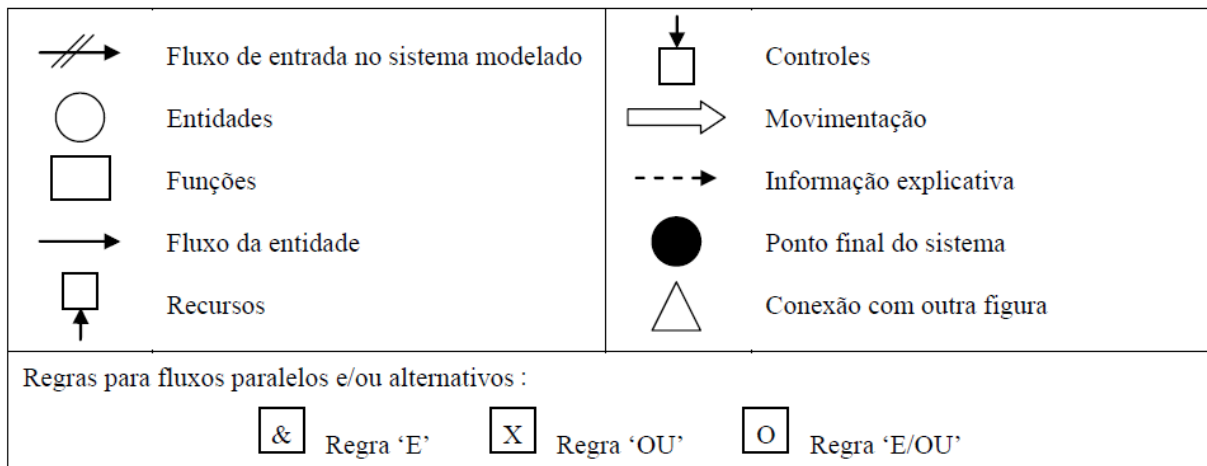
5.4 Coleta de dados e definição do modelo

Dentre os dados coletados para a representação do sistema estão: i) quantidade de estações de trabalho; ii) quantidade de operadores por estação de trabalho; iii) tempos de operação em cada estação de trabalho; iv) jornada de trabalho; e v) ordem de produção. Salienta-se que houve a preservação da identidade da empresa, ocultando informações confidenciais e/ou que pudessem caracterizá-la.

A jornada de trabalho do primeiro turno foi de 07h20min as 17h08min (9,80 horas), sendo descontado deste tempo 10 minutos para ginástica, 1 hora para almoço,

contabilizando o total de 8,63 horas. Existe uma porcentagem de capacidade máxima de 85% para carga operacional, permitindo a possibilidade de parada.

Houve a preocupação formal em desenvolver um modelo conceitual com o intuito de definir os componentes e relacionamentos lógicos que compõem o sistema simulado. Este foi elaborado por meio da técnica IDEF-SIM, proposta por Leal (2003), Leal et al. (2007) e Leal, Almeida e Montevechi (2008), na qual os símbolos utilizados para o processo esquemático estão na Figura 5.1.



Fonte: Adaptado de Leal, Almeida e Montevechi (2008) apud Nunes e Rangel (2009)

Figura 5.1 – Simbologia do processo esquemático IDEF-SIM

Leal, Almeida e Montevechi (2008, p. 05) detalham as funções dos elementos apresentados na Figura 6.1, a saber:

- Fluxo de entrada no sistema modelado: determina a criação ou entrada das entidades no modelo.
- Entidades: itens que receberão processamento no sistema (ex.: pessoas, matéria-prima, documentos etc.). O símbolo de uma determinada entidade será representado somente uma vez, no ato da criação desta.
- Funções: entende-se por funções, os locais onde a entidade sofrerá uma ação (ex. filas de estoque, postos de trabalho, esteiras de movimentação e postos de atendimento).
- Fluxo da entidade: caracteriza os instantes de entrada e saída da entidade nas funções, direcionando estas dentro do modelo.
- Recursos: simbolizam elementos que executam funções e/ou movimentam as entidades (ex.: pessoas ou equipamentos). Podem ser dotados ou não de movimento (dinâmicos ou estáticos).

- f) Controles: consistem nas regras usadas nas funções (ex. regras de filas, sequenciamento, programações etc.).
- g) Movimentação: consiste na representação do deslocamento de uma entidade, no qual o modelador confia ter impacto importante sobre o modelo.
- h) Informação explicativa: para facilitar a compreensão do modelo, pode-se usar uma explicação.
- i) Ponto final do sistema: explicita o final de determinado caminho do fluxo modelado.
- j) Conexão com outra figura: usado para dividir o modelo em figuras diferentes.
- k) Regras para fluxos paralelos e/ou alternativos: logo após uma função, dois ou mais caminhos podem ser executados de modo alternativo (regra ‘OU’), juntos (regra ‘E’), ou permitindo ambas as situações (regra ‘E/OU’).

A definição do modelo foi dada com base na própria linha já existente. A Figura 5.2 mostra o *layout* da linha de montagem. Como pode ser observado, há cinco estações de trabalho. Na ‘estação 1’ há um operador que recebe a ordem de produção (OP), fixa a ficha de acompanhamento do modelo, executa as operações conforme as instruções de processo (IP) para cada tipo de eixo, e após o término das atividades, encaminha o eixo para a próxima estação.

A ‘estação 2’ é contemplada por dois operadores que realizam suas atividades de modo simultâneo, os quais verificam a ficha de acompanhamento, realizam as operações conforme IP, e encaminham os eixos para a próxima estação após o término das atividades. As estações 3 e 4 possuem um operador cada uma e seguem o mesmo padrão de operações da ‘estação 2’ seguindo suas respectivas IP’s. A ‘estação 5’ representa o *Buy Off* da linha de eixos traseiros e é utilizado para realizar verificação, inspeção e correção. Nesta estação há um operador considerado mão-de-obra indireta, pois não realiza operações de montagem.

O modelo conceitual elaborado conforme a IDEF-SIM é explicitado na Figura 5.3. A Tabela 5.1 possui os dados para entendimento do modelo. Como pode ser notado, há diversas possibilidades de chegadas de entidades condicionadas à ordem de produção diária. As entidades são representadas por E1 até E10, as estações de trabalho são simbolizadas por L1 até L5. Ademais, foram representados os controles, recursos, informações explicativas e finalização do sistema. Cabe ressaltar que dependendo do modelo de eixo traseiro há diferenciação do tempo de processamento (TP), por exemplo, na estação L1 os eixos E1, E2, E5 e E8 gastam o mesmo tempo para serem processados, diferindo dos tempos dos eixos E3, E4 e E6 (TP iguais para esses eixos). O grupo de eixos E7 e E9 possuem TP iguais, porém diferentes dos demais e o E10 possui TP diferente de todos os outros.

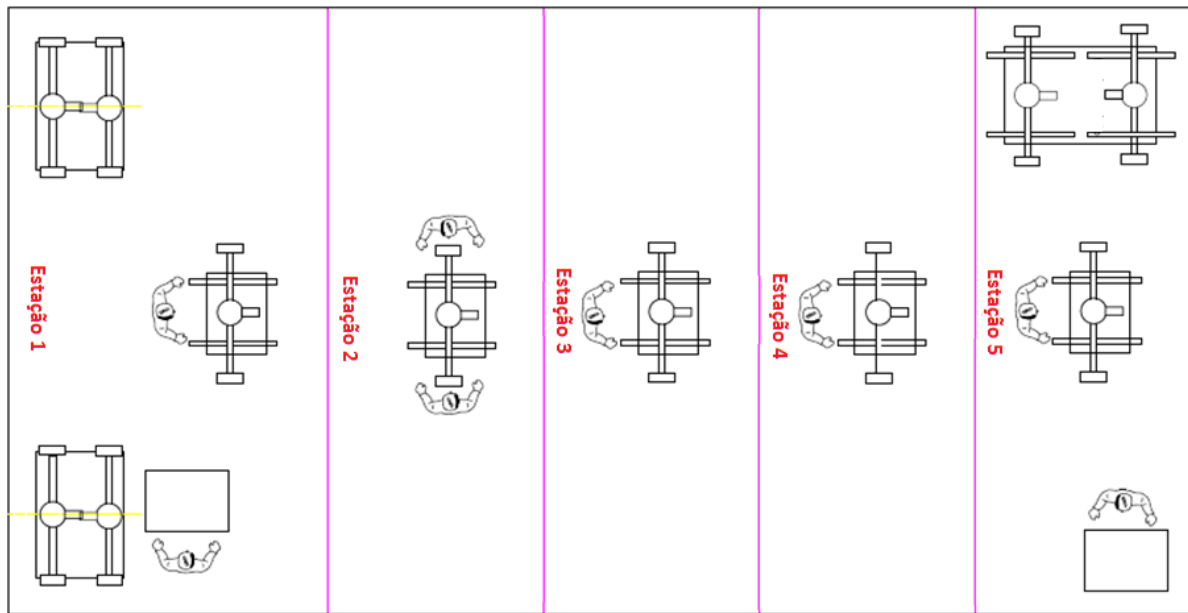


Figura 5.2 – *Lay out* da linha de montagem

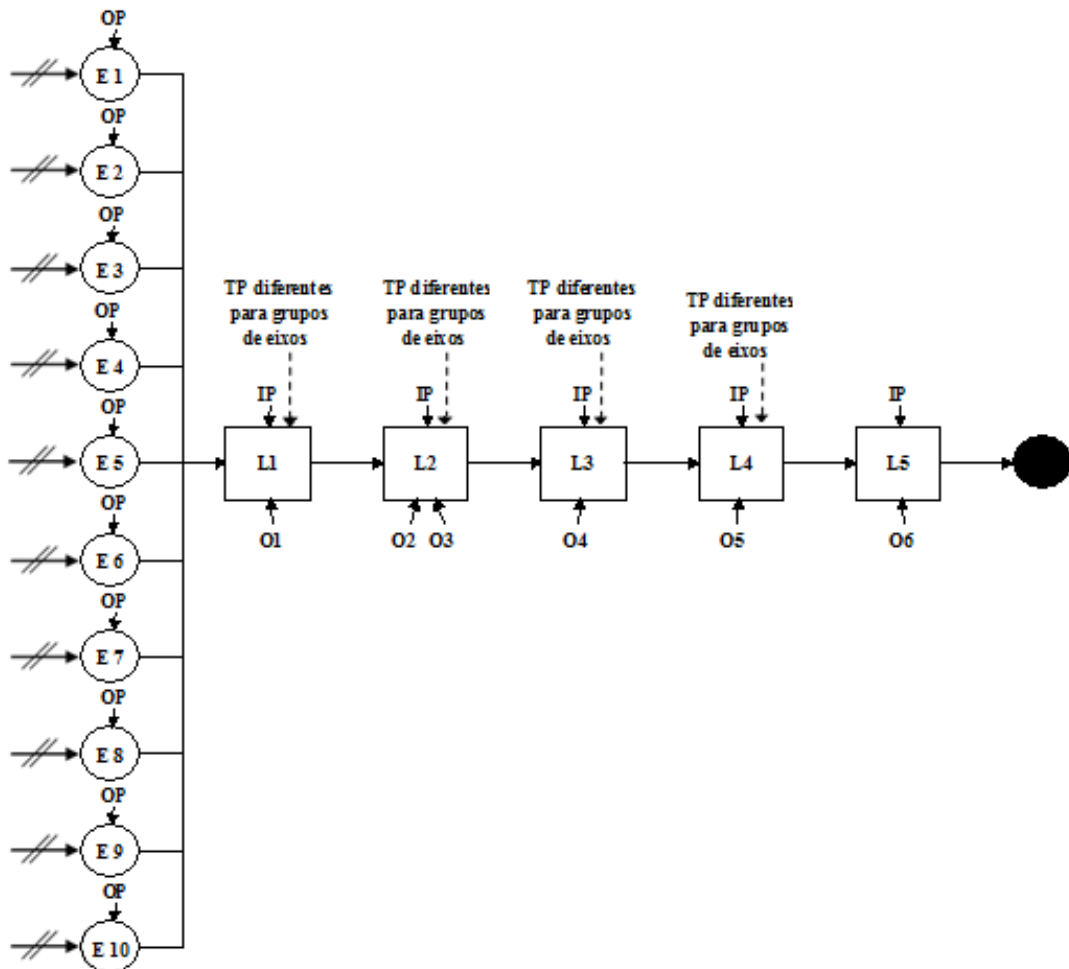


Figura 5.3 – Modelo conceitual do sistema real simulado

Tabela 5.1 – Entidades, funções, controles, recursos e informações explicativas presentes na Figura 5.3

Entidades	Nome	Funções	Nome
E 1	Eixo traseiro modelo 1	L1	Estação de trabalho 1
E 2	Eixo traseiro modelo 2	L2	Estação de trabalho 2
E 3	Eixo traseiro modelo 3	L3	Estação de trabalho 3
E 4	Eixo traseiro modelo 4	L4	Estação de trabalho 4
E 5	Eixo traseiro modelo 5	L5	Estação de trabalho 5
E 6	Eixo traseiro modelo 6		
E 7	Eixo traseiro modelo 7		
E 8	Eixo traseiro modelo 8		
E 9	Eixo traseiro modelo 9		
E 10	Eixo traseiro modelo 10		
Controles	Nome	Recursos	Nome
OP	Ordem de produção diária	O1	Operador 1
IP	Instruções de processo	O2	Operador 2
		O3	Operador 3
		O4	Operador 4
		O5	Operador 5
		O6	Operador 6
Informações Explicativas	Nome		
TP diferentes para grupos de eixos (L1)	Tempos iguais de processamento para os grupos de entidades: E1, E2, E5, E8 / E3, E4, E6 / E7, E9 / E10		
TP diferentes para grupos de eixos (L2)	Tempos iguais de processamento para os grupos de entidades: E1, E8 / E2, E5 / E3, E4, E6 / E7, E9, E10		
TP diferentes para grupos de eixos (L3)	Tempos iguais de processamento para os grupos de entidades: E1, E2, E5, E8 / E3, E4, E6 / E7, E9, E10		
TP diferentes para grupos de eixos (L4)	Tempos iguais de processamento para os grupos de entidades: E1, E8 / E2, E5 / E3, E4, E6 / E7, E9, E10		

5.5 Validação do modelo conceitual

A validação do modelo conceitual foi realizada com auxílio de especialistas que possuem conhecimento sobre o funcionamento da linha de produção foco deste estudo, com o intuito de aceitar ou não o modelo como representação do sistema real. Assim, foi realizada a validação face-a-face (presencial) por meio da análise do modelo gráfico, de acordo com Sargent (2009).

Quanto aos tempos de operação em cada estação de trabalho, estes foram representados pela distribuição triangular. Esta distribuição foi escolhida devido ao fato de não se conhecer a forma exata da distribuição, mas se conhecia estimativas para o menor valor, o valor mais provável de ocorrer e o maior valor, segundo Chwif e Medina (2007). Para o ritmo de chegada, considerou-se a distribuição de Poisson, pois melhor representa o número de eventos que ocorrem em um intervalo de tempo fixo (CHWIF; MEDINA, 2007, KELTON; SADOWSKI; STURROCK, 2007), que corresponde aos dados disponibilizados pela empresa. Conforme ressaltado na subseção 1.3.3.2, não houve liberação da empresa para a coleta dos dados *in loco*.

5.6 Construção do programa computacional e verificação

A programação do modelo foi feita no software ARENA. Para tanto, os dados coletados foram inseridos no modelo por meio de módulos e comandos de programação baseados na lógica SIMAN, sendo elaborados o fluxograma (parte que contém a lógica) e a animação do modelo. Os dados referentes à ordem de produção, processos e recursos, inseridos nos módulos e nas lógicas, não serão divulgados devido à solicitação da empresa participante da pesquisa.

A Figura 5.4 contém a vista geral do fluxograma elaborado para representação das cinco estações de trabalho, sendo que os módulos utilizados para a modelagem foram:

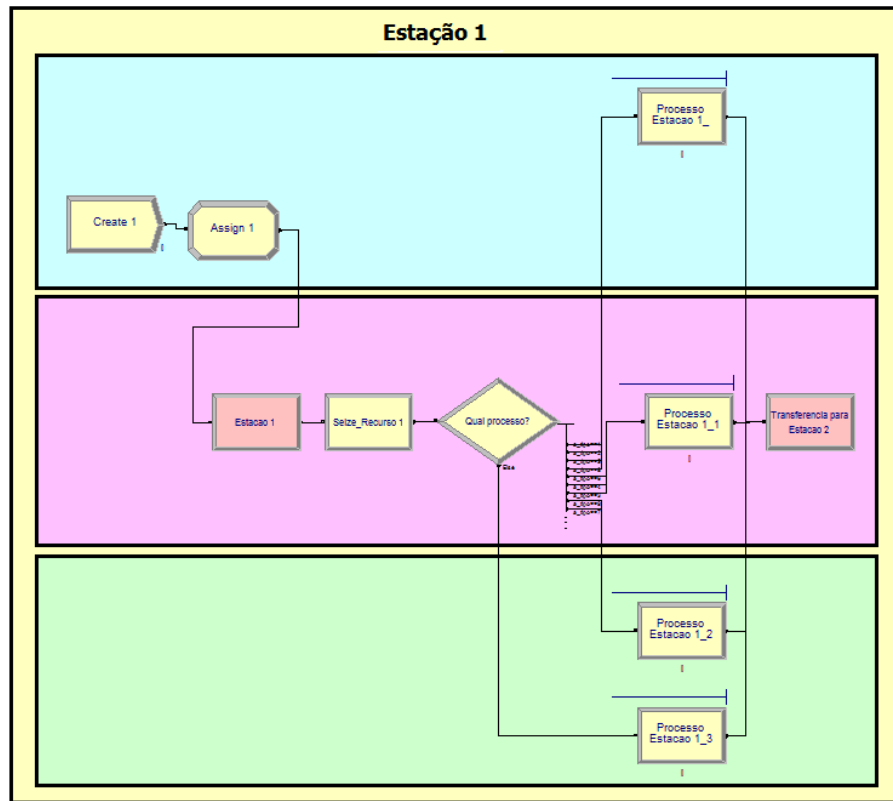


Figura 5.4 – Vista geral do fluxograma elaborado para o cenário atual (continua...)

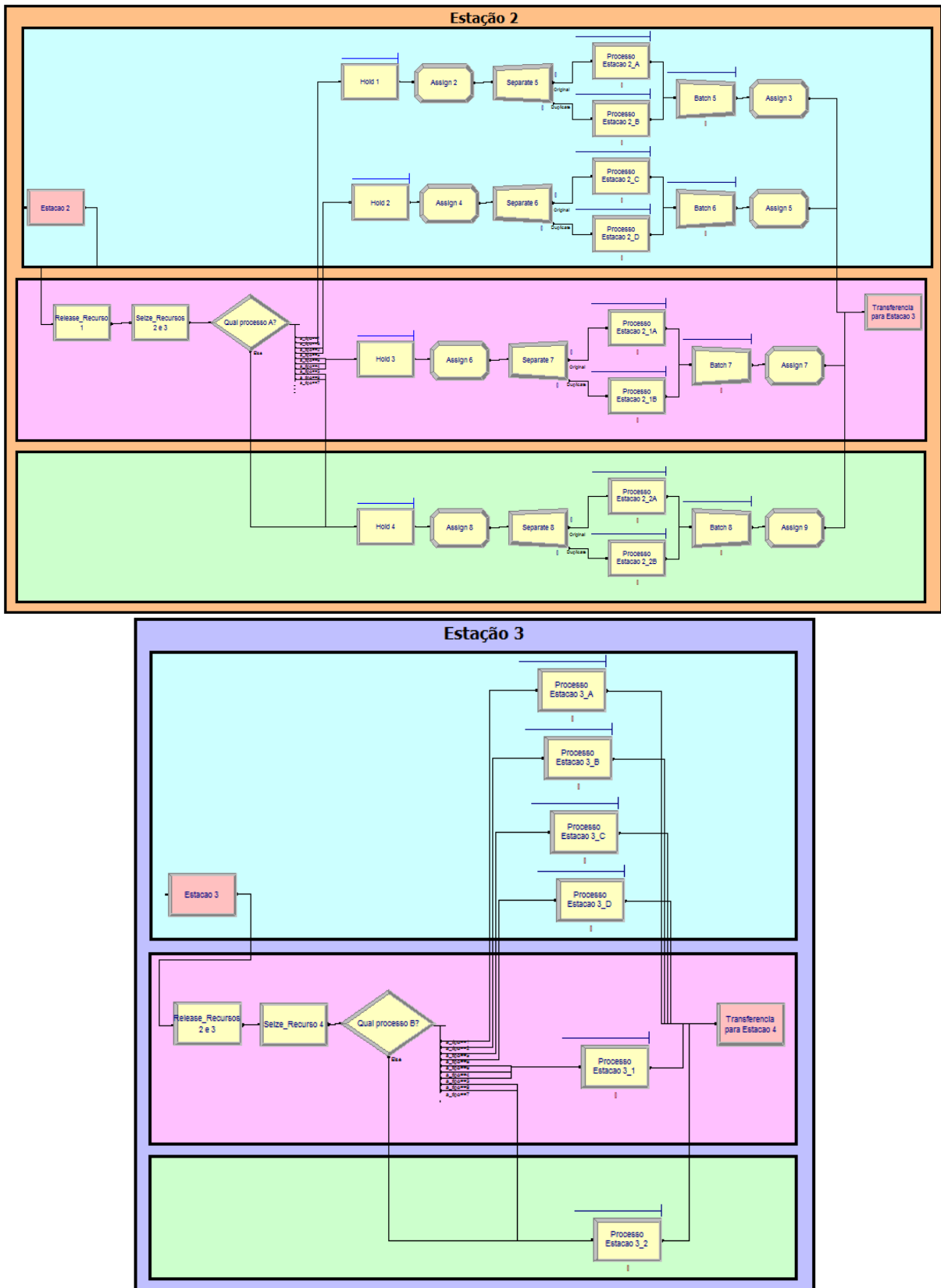


Figura 5.4 – Vista geral do fluxograma elaborado para o cenário atual (continua...)

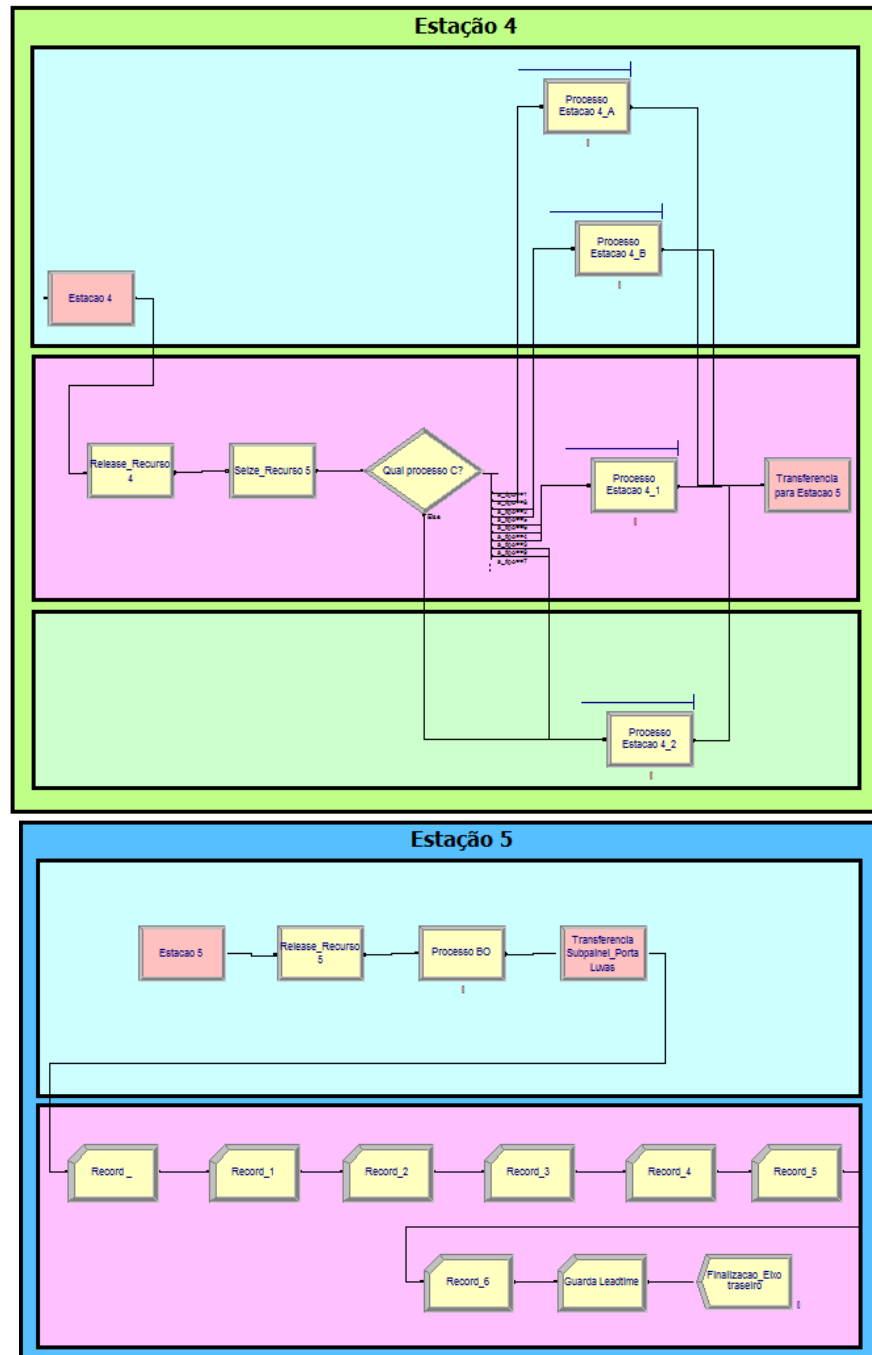


Figura 5.4 – Vista geral do fluxograma elaborado para o cenário atual (...continuação)

- Create: utilizado para representar as chegadas das entidades na estação 1 para início do processo na linha de eixos traseiros. As chegadas seguem a distribuição de probabilidade Poisson e seguem a lógica empurrada.
- Assign: esse módulo foi usado para declarar atributos, variáveis e alterar a imagem das entidades.
- Station: foram especificadas as estações de trabalho neste módulo.

- Leave: utilizado para realizar a transferência de uma entidade de determinada estação de trabalho para a próxima estação.
- Seize: usado para “segurar” a entidade na fila de espera até que o recurso esteja liberado para realizar o processamento no próximo eixo.
- Release: este módulo libera o recurso após o término do processamento para que a entidade que está na fila de espera seja direcionada para o início da operação em determinada estação de trabalho.
- Process: houve a declaração do tempo de processamento (considerando a distribuição de probabilidade triangular para representar as variações existentes na execução das atividades), do recurso utilizado e a lógica de ação (ocupar o recurso, gastar certo tempo e liberar o recurso).
- Decide: como há grupos de entidades que possuem os mesmos tempos de operação, este módulo foi utilizado para o direcionamento das entidades para o módulo process que possui o tempo de processamento correto.
- Separate: devido a uma restrição de modelagem do software utilizado, houve a necessidade de utilizar este módulo para representar a execução de dois processos simultâneos, que possuem tempos diferentes de efetivação e são realizados por dois operadores em uma mesma entidade. Assim, foi necessário duplicar provisoriamente a entidade para efetuar tal processo simultâneo.
- Batch: também foi utilizado na modelagem da estação 2 para agrupar permanentemente as entidades duplicadas.
- Hold: usado também na estação 2 para “segurar” a emissão de entidades para o módulo process até que a entidade em processo seja unida novamente.
- Record: foi usado para gravar estatísticas que não são emitidas no relatório padrão do software ARENA.
- Dispose: representa a finalização do sistema.
- Entity: módulo de planilha utilizado para vincular a entidade criada com a figura que a representa.
- Schedule: este módulo de planilha foi empregado para inserir no modelo os dados relativos à programação de horários de cada operador, segundo a jornada de trabalho.
- Resource: módulo de planilha usado para criar o vínculo entre a programação de horários com o respectivo operador.

- Set: foi utilizado par gerar a ordem das figuras das entidades de acordo com o que apresenta na ordem de produção.
- Variable: foram criadas variáveis para contar as entidades, para representar o conteúdo da ordem de produção e variáveis de controle das entidades em lógicas condicionais.

As Figuras 5.5 e 5.6 possuem detalhes da animação realizada. Na Figura 5.5 apresenta-se a simulação em andamento, na qual os recursos das estações 1, 2, 4 e 5 estão em operação e o recurso da estação 3 está liberado para o recebimento do próximo item a ser processado.

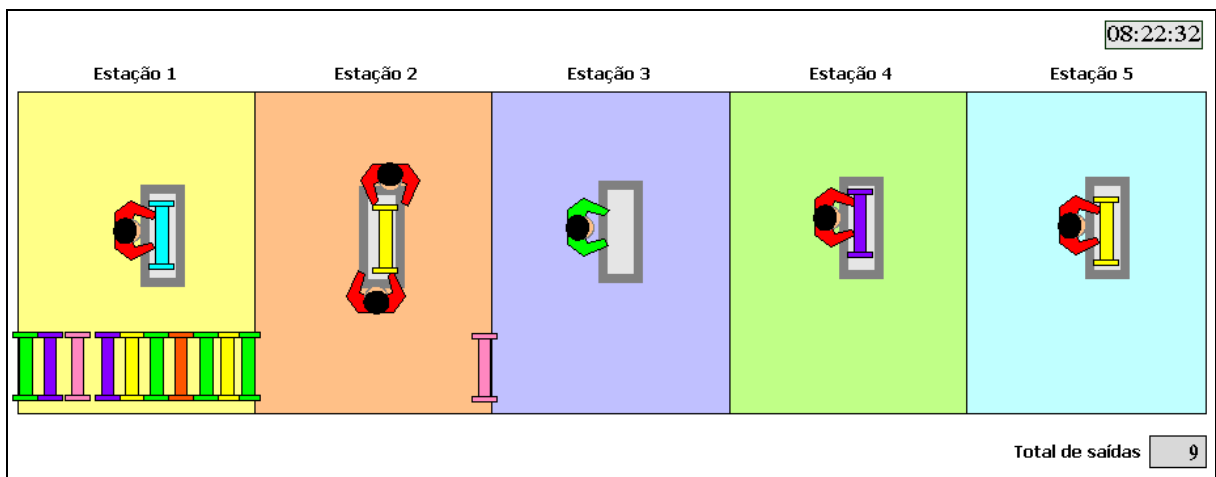


Figura 5.5 – Ilustração das estações de trabalho no simulador ARENA.

A Figura 5.6 mostra a simulação com andamento mais adiantado, na qual há um total de 67 itens já processados. Além disso, expõe um momento de ociosidade do recurso da estação 5, por exemplo, paradas para satisfação de necessidades biológicas.

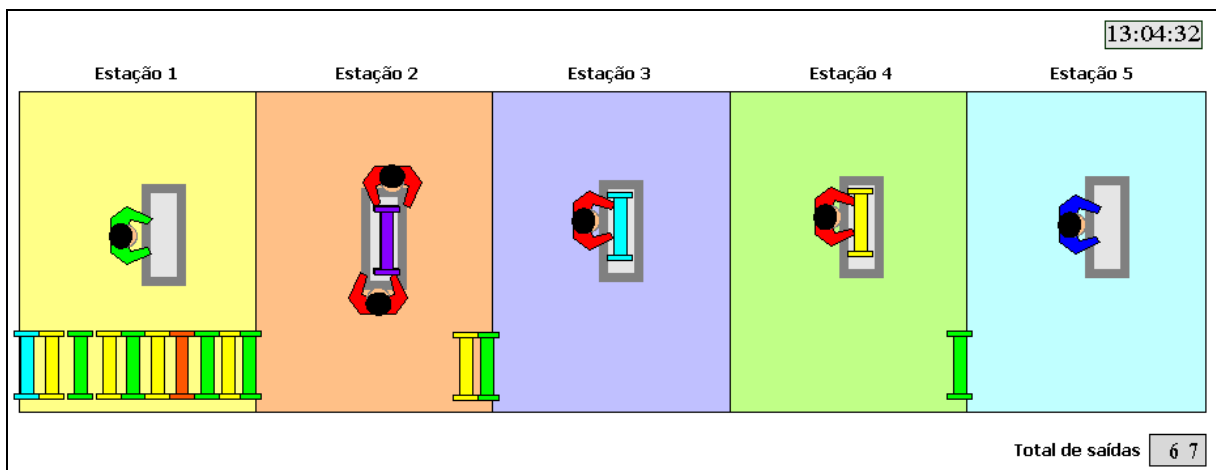


Figura 5.6 – Ilustração do status operacional no modelo simulado.

5.7 Realização de execuções piloto

Utilizou-se uma ordem de produção (OP) de um dia de produção que continha 130 veículos para realizar as execuções piloto. A quantidade de itens a serem produzidos, segundo a OP disponibilizada pela empresa, é apresentada na Tabela 5.2. Nesta ordem houve somente a produção de sete dos dez tipos de modelos de eixos que poderiam ser fabricados. Os eixos 'E' e 'B' obtiveram a maior frequência de produção, contabilizando respectivamente 51 e 35 eixos.

Tabela 5.2 – Quantidade de eixos produzidos em um dia de produção

Modelo	Quantidade
Eixo A	3
Eixo B	35
Eixo C	16
Eixo D	7
Eixo E	51
Eixo F	13
Eixo G	5

Fonte: dados da pesquisa

Durante a terceira execução foi verificado que o sistema seria capaz de rodar a produção de 130 modelos conforme tempo de operação e jornada de trabalho, mas ainda não obteve êxito devido à produção terminar faltando tempo para enceramento do expediente. Na quarta execução foi inserida na programação a jornada de trabalho com o tempo de ginástica, tempo de almoço e tempo de ociosidade para cada operador, pois estes não podem trabalhar com 100% de carga.

5.8 Validação do modelo programado

A validação do modelo programado foi realizada por meio de comparação com o comportamento real do sistema. Assim, houve a comparação da carga operacional da planilha de balanceamento da empresa com o relatório de recursos emitido pelo software de simulação ao final da rodada.

Foi possível verificar que os recursos disponíveis não ultrapassaram a carga operacional média de 85% dentro do tempo da jornada de trabalho. As cargas operacionais de cada operador são diferentes, porém, não ultrapassaram o limite estipulado.

Além disso, foi feito o rastreamento por meio do acompanhamento das entidades através do modelo, de acordo com Sargent (2009), para verificar se a lógica do modelo estava correta e se a precisão necessária foi mantida.

A Figura 5.7 apresenta a animação do término da simulação ao final da jornada de trabalho com a quantidade total máxima de saídas de 130 itens finalizados e o horário de término do turno de trabalho condizente com a realidade do sistema real. Ressalta-se que o valor médio do total de saídas é discutido na seção 5.11

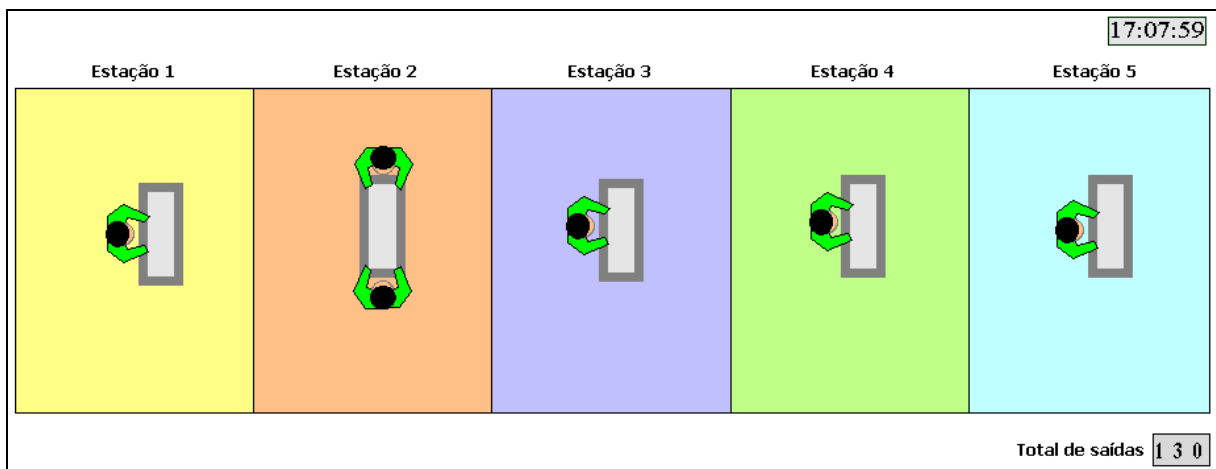


Figura 5.7 - Ilustração do término da jornada de trabalho no simulador ARENA.

5.9 Projeto dos experimentos

Nesta etapa, a principal preocupação foi garantir que as configurações consideradas fornecessem o êxito da simulação da atual realidade da linha de produção estudada.

Como o sistema estudado é considerado terminal, ou seja, as condições iniciais e o período simulado são fixos e o objetivo é compreender o comportamento do sistema ao longo deste período predeterminado, a principal preocupação no projeto do experimento é a determinação do número de replicações para determinação da média (FREITAS FILHO, 2008, LAW; KELTON, 2000). Para tal tarefa, foram seguidas as recomendações de Freitas Filho (2008) para o uso da ferramenta computacional *Output Analyzer* presente no ambiente Arena.

Inicialmente, foram selecionadas as seguintes variáveis de desempenho para realizar os testes: tempo médio de fluxo (tempo médio de um eixo no sistema) e estoque

intermediário na estação de trabalho 1 (número médio de entidades em fila aguardando a liberação do Recurso 1). Assim, pôde-se ter ideia mais clara sobre o comportamento do sistema para as diversas replicações efetuadas. Como se pode observar nas Figuras 5.8 e 5.9, as variáveis não apresentam comportamento estável.

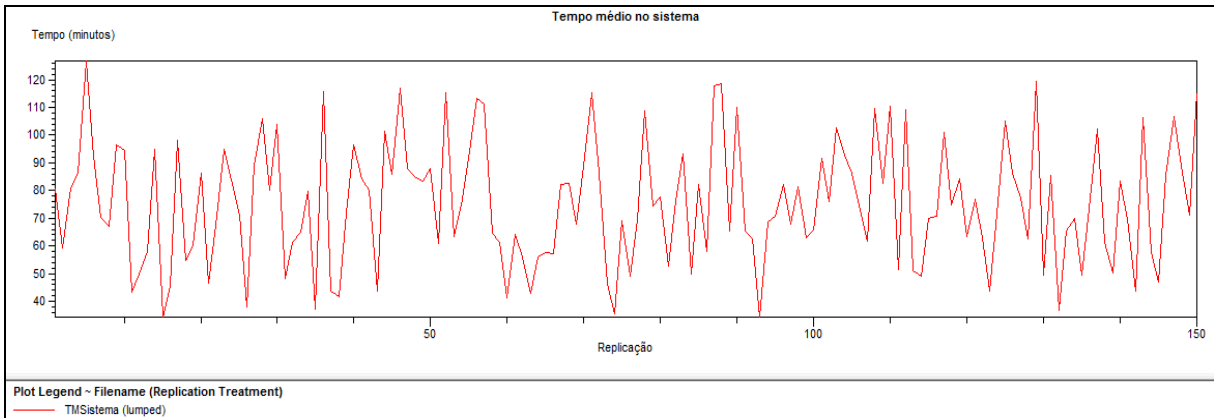


Figura 5.8 – Gráfico do comportamento do tempo médio de fluxo em 150 replicações.

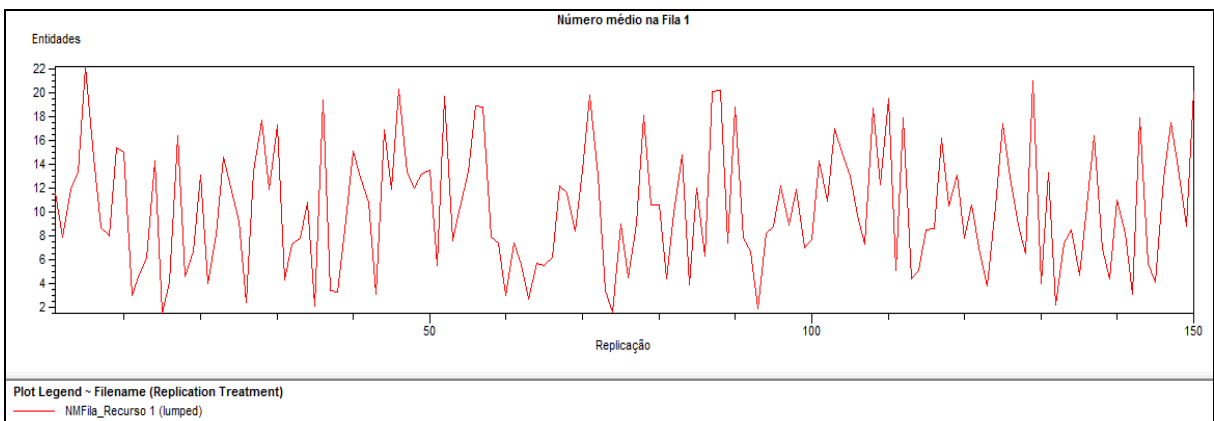


Figura 5.9 – Gráfico do comportamento, em 150 replicações, do estoque intermediário na estação de trabalho 1.

Visualizado o comportamento das variáveis, partiu-se para a identificação do intervalo de confiança. Uma amostra piloto de 50 replicações foi definida para o início do teste, no entanto, esta não foi ideal para obtenção dos valores médios. Deste modo, foram atribuídas 150 replicações. Para os cálculos, utilizou-se o nível de confiança 95%. Como pode ser observado para a variável ‘tempo médio de fluxo’ na Figura 5.10, a amostra relativa a essa variável contém 150 observações e apresenta uma média de 76,7 minutos com um desvio-padrão de 23,1 minutos. O valor do semi-intervalo de confiança, dado por h (*half-width*), é de 3,73 minutos. Este valor é fornecido pela ferramenta *Output Analyzer*, presente

no software ARENA, com o qual forma um intervalo de confiança. É interpretado como a confiança de que em 95% das replicações obtém-se uma média que estará no intervalo da média obtida \pm o semi-intervalo (KELTON, SADOWSKI; SADOWSKI, 2007).

Já, para a variável ‘estoque intermediário na estação de trabalho 1’, para as 150 observações realizadas, a média foi de 10,3 entidades e o desvio-padrão foi de 5,19 entidades. Ademais, o valor do semi-intervalo de confiança foi 0,837 entidades, como pode ser notado na Figura 5.10.

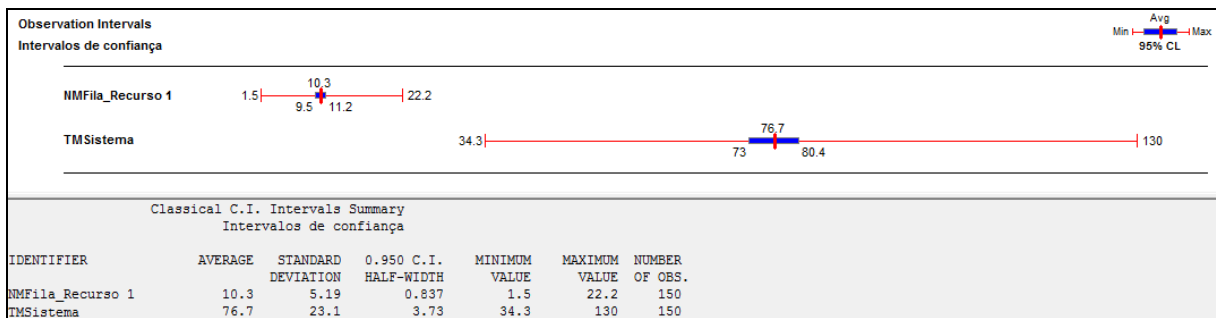


Figura 5.10 – Intervalos de confiança para as variáveis tempo médio de fluxo e estoque intermediário na estação de trabalho 1.

Compararam-se, então, os coeficientes de variação das amostras, por meio da razão entre o desvio-padrão e a média amostral. Para o tempo médio de fluxo obteve-se o valor 0,301 e para estoque intermediário na estação 1 o valor foi 0,504, o que representa menor variabilidade na primeira variável.

Como os semi-intervalos de confiança (*half-width*) são menores que 10% das médias amostrais, o número utilizado de replicações (150) é considerado satisfatório para maior precisão nos resultados.

Ainda, houve a determinação da duração da replicação e do *warm-up period* (período de aquecimento). A duração da replicação foi de 9,80 horas que considera a jornada de trabalho dos operadores acrescido do tempo para atividades de ginástica laboral e horário de almoço. Quanto ao período de aquecimento, estabeleceu-se o valor 0,43 horas, que compreende o período da ginástica laboral e a representação da linha de produção já em funcionamento para a produção da segunda peça. Se o modelo fosse simulado a partir do tempo zero, este estaria ‘vazio’ e iniciaria a produção da primeira peça, o que não representa a realidade e afetaria o cálculo das médias por meio do software ARENA.

5.10 Realização das execuções de simulação

Após a realização do projeto dos experimentos, foram efetuadas outras 150 replicações para obtenção do relatório com os resultados finais.

5.11 Análise de resultados

O total médio de saídas do sistema, em 150 replicações, foi de 123 entidades (eixos traseiros) prontos ao final do dia de trabalho (9,80 horas – turno das 7:20 até 17:08h, considerando tempos de paradas (descanso, almoço etc.), conforme a ordem de produção emitida. O valor máximo de saídas foi de 130 entidades e o valor mínimo foi de 101 eixos. O tempo médio de fluxo foi de 76,7 minutos (1,278 horas), com um valor mínimo de 34,3 minutos e um valor máximo de 130 minutos, como visto na Figura 5.11.

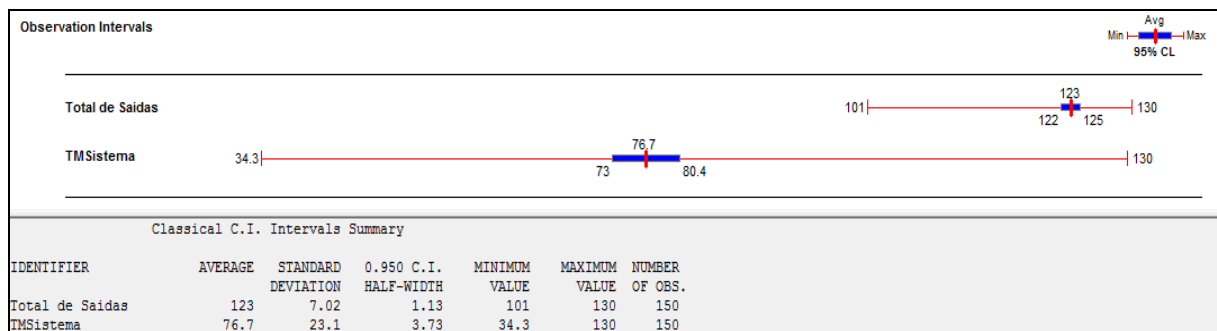


Figura 5.11 – Total médio de saídas e tempo médio de fluxo

Os dados de utilização dos funcionários ao final da simulação foram (vide Figura 5.12):

- Operador 1 (estação 1): obteve uma média de 78,0% de utilização ao final da simulação;
- Operador 2 (estação 2): obteve uma média de 75,3% de utilização;
- Operador 3 (estação 2): obteve uma média de 77,2% de utilização;
- Operador 4 (estação 3): obteve uma média de 77,7% de utilização;
- Operador 5 (estação 4): obteve uma média de 75,8% de utilização;
- Operador 6 (estação 5): obteve uma média de 68,6% de utilização.

Nota-se que os valores máximos atingidos não ultrapassaram o valor permitido na empresa de 85% de utilização.

As Figuras 5.13 e 5.14 apresentam dados sobre os estoques intermediários geradas durante o processo de simulação e os tempos médios de fila. Houve formação de

estoque em todas as estações de trabalho, sendo que o maior foi, em média, 10,3 entidades aguardando o processamento na estação 1 (legenda NQ_R1). O tempo de fila na estação 1 (legenda WT_R1), contabilizou 47,5 minutos. Esses valores se devem ao ritmo de chegada das entidades no início da linha de eixo traseiro e à lógica de produção empurrada atualmente aplicada.

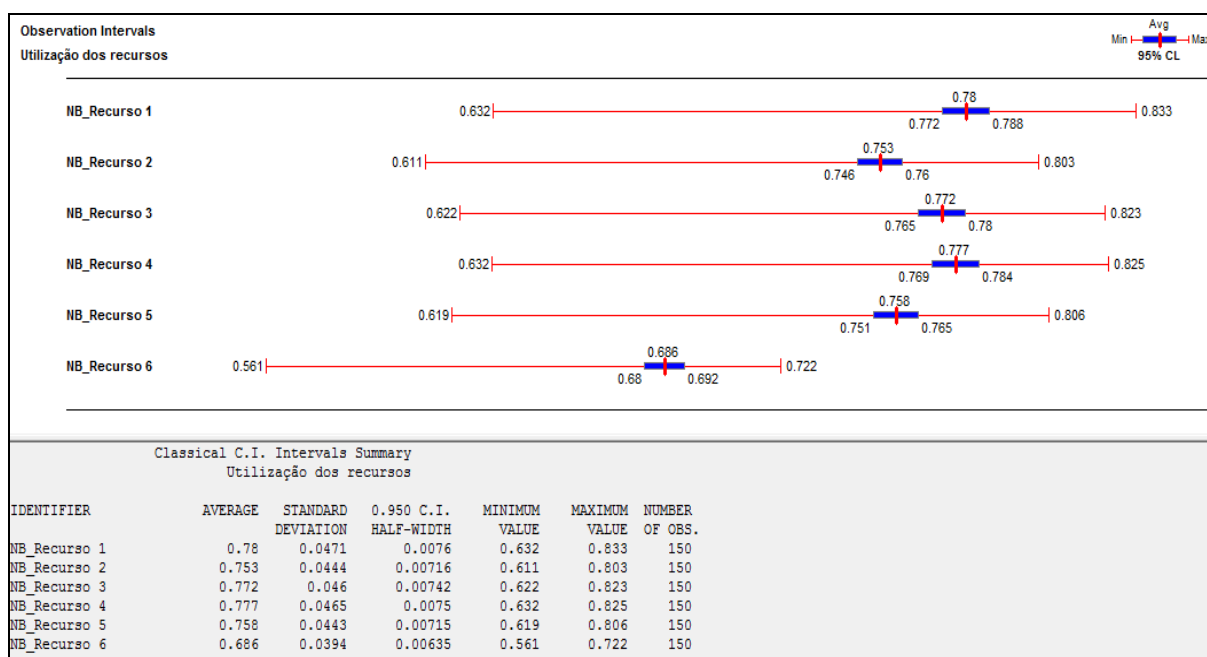


Figura 5.12 - Utilização dos operadores presentes na linha de eixos traseiros.

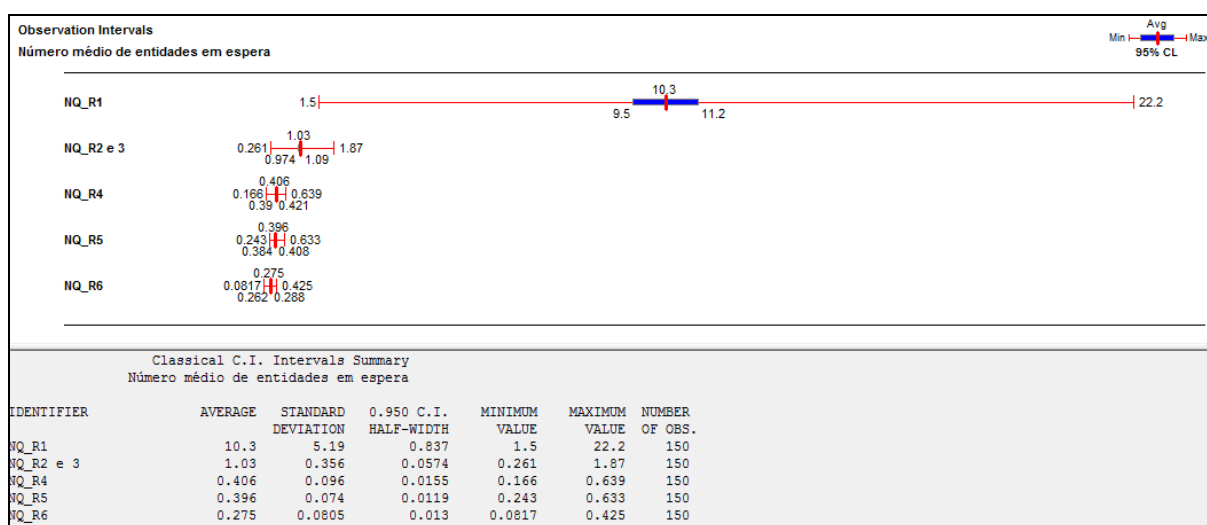


Figura 5.13 – Estoque intermediário médio por estação de trabalho.

Na estação 2, o estoque intermediário médio (EI) foi de 1,03 eixos, obtendo o tempo médio de fila em 4,76 minutos. Já, na estação 3, o EI foi de 0,406 entidades aguardando o processamento, afetando o tempo médio de fila em 1,86 minutos.

Também, em média 0,396 entidades ficaram no EI da estação 4 devido à liberação da estação 3. Isso também afetou o tempo médio de fila na estação 4, totalizando 1,81 minutos. Na estação 5, o EI foi de 0,275 entidades aguardando o processamento. Isso gerou o tempo médio de fila de 1,26 minutos.

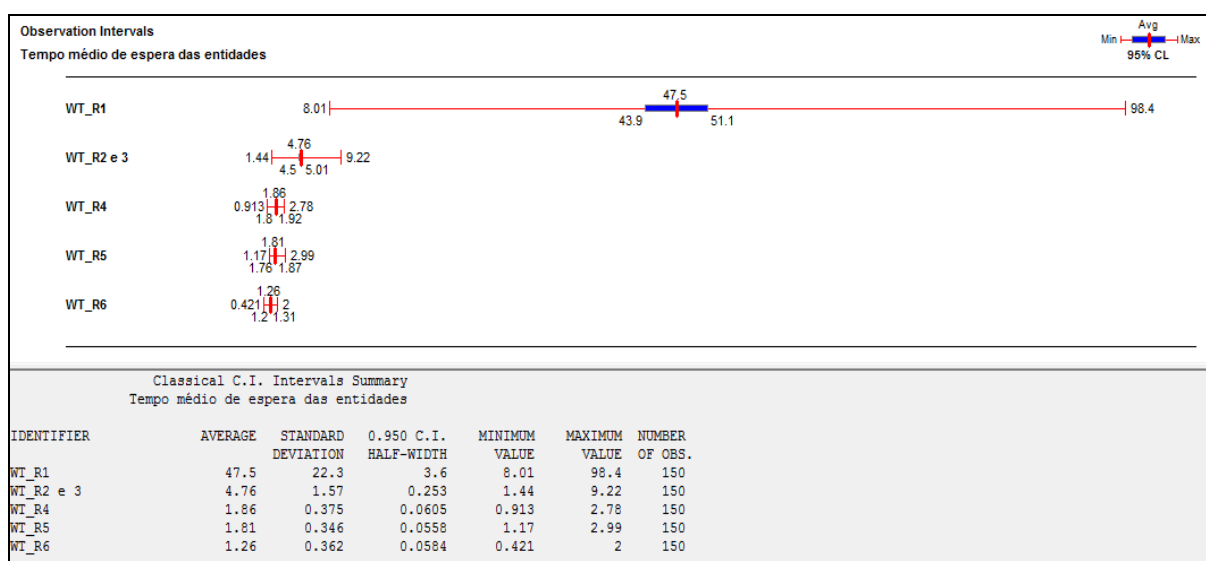


Figura 5.14 – Tempo médio de fila das entidades por estação de trabalho.

5.12 Documentação e implementação

Nesta etapa, todos os passos da simulação foram documentados, visando o entendimento do modelo construído por interessados no conteúdo desta tese e outros funcionários da empresa que forem utilizá-lo para adaptações e construção de cenários de melhorias. Ressalta-se que não houve a implementação dos resultados na empresa durante a execução dessa tese.

5.13 Considerações finais

O objetivo almejado neste capítulo foi atingido, pois houve a modelagem e simulação do cenário atual de uma parte da linha de produção de uma empresa

automobilística. Para a realização da simulação do cenário, consideraram-se os passos sugeridos por Law e Kelton (1994). Destaca-se que a realidade da linha estudada segue a lógica de sistemas de produção empurrados, ou seja, cada estação de trabalho empurra o trabalho para a próxima estação, sem considerar se esta poderá utilizá-lo (SLACK *et al.*, 2002).

Houve a produção de 123 eixos em média, sendo que o valor máximo que o sistema atingiu foi de 130 jpd (*jobs per day* – veículos por dia) e a carga operacional dos operadores não ultrapassou o limite de 85%. Esses valores condizem com a realidade do sistema em estudo.

Por meio da análise dos resultados obtidos, verificou-se que a utilização média dos operadores varia de 68,6 % a 78,0%, sendo que há a possibilidade de elaborar cenários de melhoria contemplando melhor distribuição da carga operacional. Além disso, notou-se que a estação de trabalho 1 possui recurso restritivo, sendo que se houvesse melhor configuração deste local, poderia haver diminuição do tempo médio de espera por processamento dos eixos traseiros logo no início da linha de produção.

As principais contribuições deste capítulo consistem na elaboração da base para a simulação dos SCO selecionados e na aquisição de maior conhecimento sobre o sistema real da empresa. Como pesquisa futura, sugere-se efetuar uma pesquisa-ação com intuito de implementar e implantar cenários de melhoria na prática empresarial e verificar os benefícios que possam surgir.

CAPÍTULO 6 – SIMULAÇÃO DE SCO COM CARACTERÍSTICAS PUXADAS PARA A EMPRESA ESTUDADA

6.1 Considerações Iniciais

A modelagem e a simulação dos sistemas CONWIP, *kanban* e TBC são o foco deste capítulo. Ressalta-se que foram seguidos os mesmos passos para um estudo de simulação sugerido por Law e Kelton (2000) e discutidos no capítulo 5 (modelagem e simulação do cenário atual da linha de eixos traseiros). Neste texto as etapas são discutidas de forma agregada para cada sistema.

Algumas considerações comuns aos três SCO simulados são:

- O sistema real analisado lida com 10 modelos diferentes que seguem uma sequência pré-estabelecida. Na ordem de produção utilizada há a fabricação de 7 modelos distintos;
- O material é transportado de uma em uma unidade (devido às dimensões dos eixos) e sem atrasos;
- As estações de trabalho operam assincronamente, para que as peças possam ser carregadas sempre que estiver terminado o processamento e a devida autorização tenha sido recebida;
- O carregamento dos trabalhos é autorizado segundo política FCFS (*first-come, first-serve* – primeiro a entrar, primeiro a ser servido).

Essas considerações refletem a realidade da empresa e são apoiadas por Khojasteh-Ghamari (2009), que afirma que estas simplificam o estudo pela redução de variáveis consideradas. Algumas variáveis desconsideradas, como o tempo de transmissão do *kanban* e tamanho do lote, podem ser vistas como detalhes de implementação ao invés de aspectos essenciais para as diferentes políticas de controle. Além disso, essas considerações não são essenciais para as políticas de controle e não influenciam as conclusões. Ao elaborar uma implementação ideal, fica mais nítido o comportamento e limitações inerentes a política de controle (KHOJASTEH-GHAMARI, 2009).

Salienta-se que a utilização máxima do recurso permitida na empresa (85% do tempo) e as paradas programadas continuaram a ser consideradas na modelagem dos SCOs. Ainda, o período de aquecimento (*warm-up period*) e a duração da replicação foram considerados os mesmos do cenário atual.

Realizou-se a otimização do número de cartões nos sistemas analisados. Gaury, Perreval e Klejin (2000) advertem que comparações de estratégias de controle da produção somente fazem sentido quando as configurações ótimas são comparadas e que devem ser utilizadas medidas de desempenho condizentes com os sistemas. A otimização do número de cartões foi feita no software OptQuest for Arena[®], o qual usa o algoritmo otimizador *Scatter Search*, inicialmente proposto por Glover (1997). Uma estrutura geral de problemas de simulação que envolvem otimização pode ser encontrada em Fu, Chen e Shi (2008), Lee et al. (2008) e Fu (1994).

A presente parte foi estruturada da seguinte forma: i) na seção 6.2 há a modelagem e simulação do CONWIP; ii) na seção 6.3 está a modelagem e simulação do *kanban*; iii) na seção 6.4 é apresentada a modelagem e simulação do TBC; iv) na seção 6.5 há a análise dos resultados obtidos nos SCO simulados; e, por fim, na seção 6.6 há as considerações finais.

6.2 Modelagem e Simulação do CONWIP

Com base no cenário atual do sistema em estudo, que trata de um sistema empurrado, houve a inserção da lógica de funcionamento do sistema CONWIP, no qual há uma quantidade fixa de cartões alocados a determinada linha e, assim que o produto recebe todos os processamentos necessários, o cartão retorna para início da linha.

Nesse contexto, elaborou-se um modelo conceitual conforme o método IDEF-SIM (discutido no capítulo 5) para guiar a modelagem, o qual é apresentado na Figura 6.1. Este foi validado de acordo com as considerações de Sargent (2009). Foi verificado se a teoria e suposições que envolvem o sistema CONWIP (tratadas no capítulo 3) estavam presentes no modelo desenvolvido.

Para a determinação do número de cartões, considerou-se a seguinte fórmula baseada na Lei de Little (SPEARMAN; WOODRUFF; HOOP, 1990 apud HUANG; WANG; IP, 1998a):

$$\theta = \mu t \tag{6.1}$$

Onde:

- θ é o número médio de cartões;

- μ é o *throughput* médio da linha de produção. Segundo Hopp e Spearman (1996) apud Marek, Elkins e Smith (2001), este valor deve ser igual à taxa de chegada das entidades no sistema, ou seja, 1/3,123 eixos por minuto;
- t é o tempo médio para um cartão do produto passar pela linha de produção toda. Para determinação desse valor, foi considerada a somatória dos tempos médios de processamento de cada estação de trabalho (ET) fornecidos pela empresa, totalizando 18,617 minutos (ET1= 3,277 min., ET2 = 3,993 min., ET3 = 3,767 min., ET4 = 4,457 min., ET5 = 3,123 min.). Enfatiza-se que esse foi o valor utilizado devido aos dados que a empresa poderia fornecer para a realização da pesquisa.

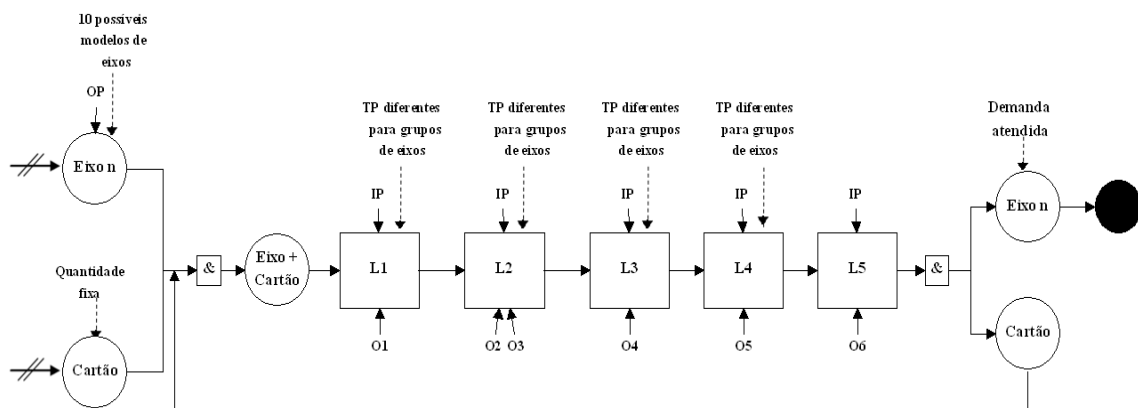


Figura 6.1 – Modelo conceitual do sistema CONWIP.

Assim, o número de cartões deveria ser 5,961, o qual deve ser aproximado o valor inteiro superior conforme Sipper e Bulfin Jr (1997). Portanto, o número de cartões foi considerado 6. Essa quantidade de cartões foi utilizada como base para validação do comportamento do modelo, sendo que a quantidade ideal de cartões para gerar o maior número de saídas possível é dado pela otimização explicitada na subseção 6.2.1.

De posse dos dados necessários para representação do sistema CONWIP, houve a programação do modelo no software Arena. A vista geral do fluxograma construído para a lógica de controle está na Figura 6.2. Ressalta-se que, entre essas lógicas, houve a representação das cinco estações de trabalho conforme apresentado no Capítulo 5.

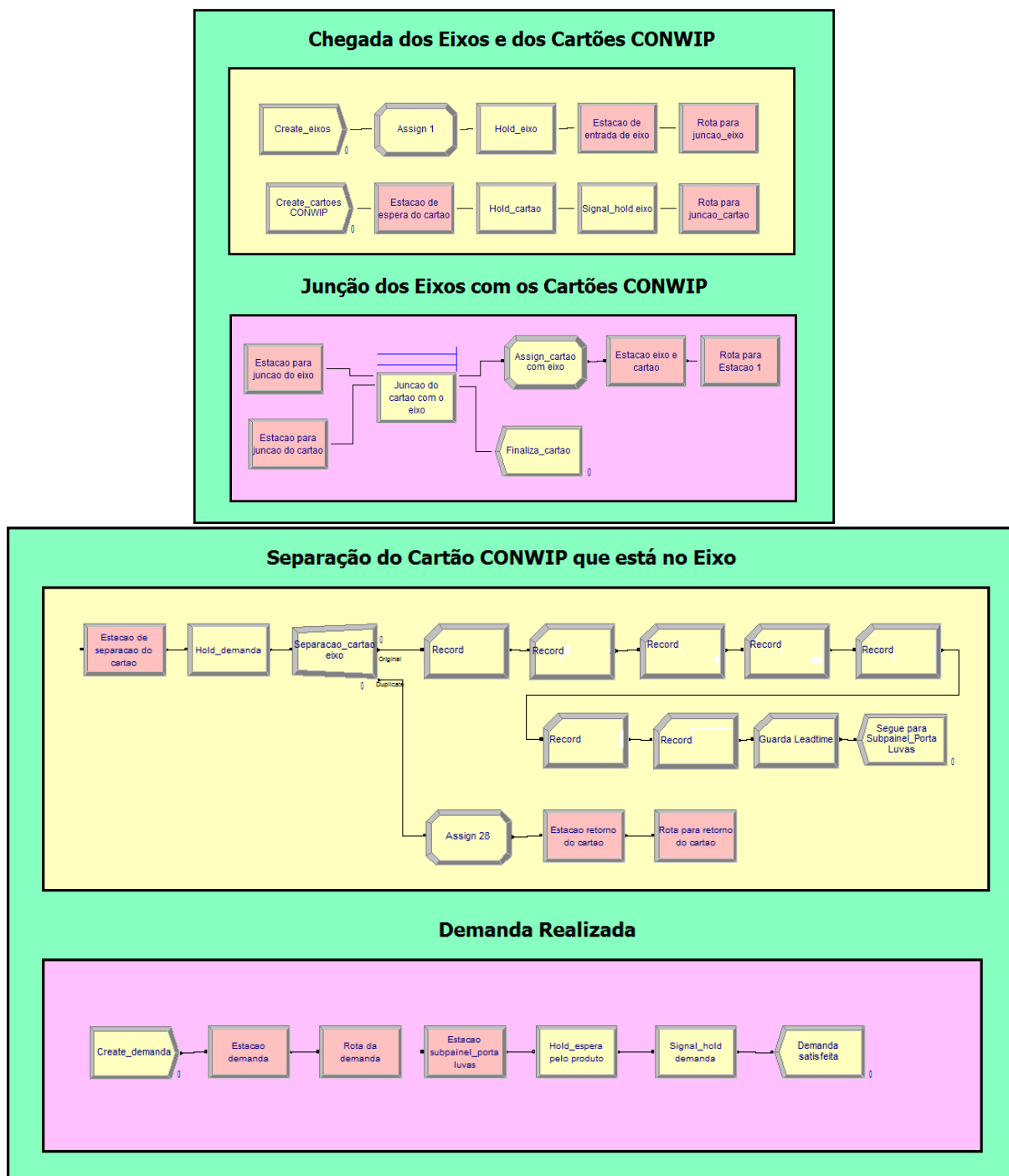


Figura 6.2 – Lógica de controle do CONWIP.

Houve a elaboração da lógica de chegada dos eixos (ordem de produção com 130 itens) e dos cartões CONWIP (que consiste em uma quantidade fixa). Para tal representação, foram usados os módulos *create*, *assign*, *hold*, *signal*, *station* e *route*. Quanto à junção dos eixos com os cartões CONWIP, utilizaram-se os módulos *station*, *match*, *assign*, *route* e *dispose*. Nesta parte da lógica, o cartão é anexado ao eixo e, somente após essa liberação, o item entra na estação 1 para início do processamento necessário. A separação do

cartão CONWIP que está junto ao eixo é dada à medida que a demanda é satisfeita. A demanda da linha de eixos traseiros é composta pela linha ‘subpainel e porta luvas’, que solicita um eixo a cada 3,123 minutos. Para representar essa parte, usaram-se os módulos *station, hold, separate, signal, route, assign, record e dispose*.

A Figura 6.3 apresenta detalhes da animação feita com base no fluxograma elaborado. Há o destaque para a junção do eixo com o cartão para autorização da entrada da entidade na linha e, também, o retorno do cartão assim que o eixo é retirado no final da linha pelo funcionário da estação ‘subpainel e porta luvas’.

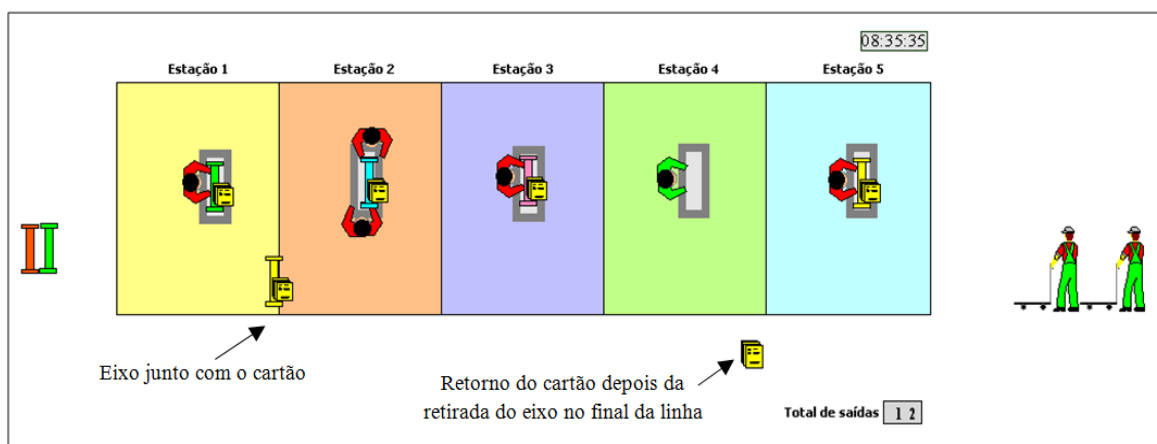


Figura 6.3 – Animação da lógica de controle do CONWIP aplicado ao sistema real.

O modelo programado também foi validado conforme Sargent (2009). Rastream-se as entidades (eixos e cartões) através do modelo e verificou-se que a lógica estava correta e a precisão estava de acordo com o necessário.

Por meio da ferramenta *Output Analyzer*, foi averiguado que os semi-intervalos de confiança (*half-width*) são menores que 10% das médias amostrais e, portanto, 150 replicações são satisfatórias para maior precisão nos resultados (vide Figura 6.4). Este teste foi realizado para as variáveis ‘tempo médio de fluxo’ (26,2 minutos), e ‘estoque intermediário médio na estação 1’ (0,423 eixos), que possuem maior coeficiente de variação.

Observation Intervals		Intervalo de confiança		Min Avg Max 95% CL		
TMSistema		26,2	24,7	28		
NMFila_Recurso 1	0,423	0,301	0,643			
		0,414	0,433			
Classical C.I. Intervals Summary						
Intervalo de confiança						
IDENTIFIER	AVERAGE	STANDARD DEVIATION	0.950 C.I. HALF-WIDTH	MINIMUM VALUE	MAXIMUM VALUE	NUMBER OF OBS.
TMSistema	26.2	0.6	0.0968	24.7	28	150
NMFila_Recurso 1	0.423	0.0574	0.00926	0.301	0.643	150

Figura 6.4 – Intervalos de confiança encontrados no modelo CONWIP

6.2.1 Otimização do número de cartões CONWIP

Essa subseção descreve o preparo da otimização, para uso da ferramenta OptQuest for Arena, apontando o uso combinado de simulação e otimização como advogado por FU (2002). Conforme Rockwell Automation (2006) e Souza (2008), os três principais elementos para a definição do problema de otimização são os controles, as restrições e os objetivos, a saber:

- Controles: são variáveis ou recursos do Arena que podem ser manipulados para afetar o desempenho de um sistema simulado. O modelo de otimização é formulado em termos dos controles selecionados. Os valores dos controles são alterados antes de realizar cada simulação até que os melhores índices estejam dentro do limite estipulado (limite inferior, valor sugerido e limite superior). Nesta pesquisa, o controle é o número de cartões CONWIP a ser utilizado no sistema, sendo que os limites utilizados foram: i) limite inferior – 1 cartão; ii) valor sugerido – 6 cartões, ou seja, o valor encontrado por meio da aplicação da fórmula baseada na Lei de Little; iii) limite superior – 20 cartões.
- Restrições: são os relacionamentos entre controles e/ou respostas (limites) que restringem o espaço solução investigado. O OptQuest diferencia entre restrições lineares e não-lineares. A solução que satisfaz todas as restrições é considerada como uma solução viável e caso uma ou mais restrições sejam violadas, a solução é dada como inviável. No presente modelo, foram consideradas restrições de utilização de cada um dos operadores, o qual não poderá exceder o limite de 85% permitido na empresa.
- Objetivo: é uma resposta matemática ou uma expressão usada para representar o objetivo do modelo. O OptQuest encontra o valor ótimo para o objetivo pela seleção e melhoramento de diferentes valores para os controles. O objetivo do modelo para o CONWIP é a maximização do total de saídas do sistema (quantidade de eixos terminados após o dia de trabalho).

Assim, o problema pode ser definido do seguinte modo:

- Objetivo: Maximizar o total de saídas (eixos prontos ao final do dia)
- Restrições:
 - Utilização do Operador 1 $\leq 85\%$
 - Utilização do Operador 2 $\leq 85\%$
 - Utilização do Operador 3 $\leq 85\%$
 - Utilização do Operador 4 $\leq 85\%$

- Utilização do Operador 5 \leq 85%
- Utilização do Operador 6 \leq 85%
- Controle: número de cartões utilizados no sistema CONWIP.

Para os experimentos de otimização efetuados, considerou-se o mínimo de 150 replicações por simulação do OptQuest. Este valor foi estipulado anteriormente para os valores médios encontrados possuírem a precisão necessária. Quanto à determinação do número de simulações, atribuiu-se o valor 100, que é o número mínimo sugerido por Rockwell Automation (2006) para um problema que considera menos que 10 controles.

O andamento da otimização no OptQuest é mostrado na Figura 6.5. A janela de otimização possui as informações sobre status da otimização, com a especificação do número da atual simulação, a quantidade de replicações e qual simulação apresentou o melhor resultado. Ainda, há o quadro sobre a função objetivo, apresentando a sua viabilidade ou não para o melhor valor encontrado até o momento e para o atual valor, e também os quadros dos controles e das restrições, com o tipo (linear ou não-linear) e a sua viabilidade.

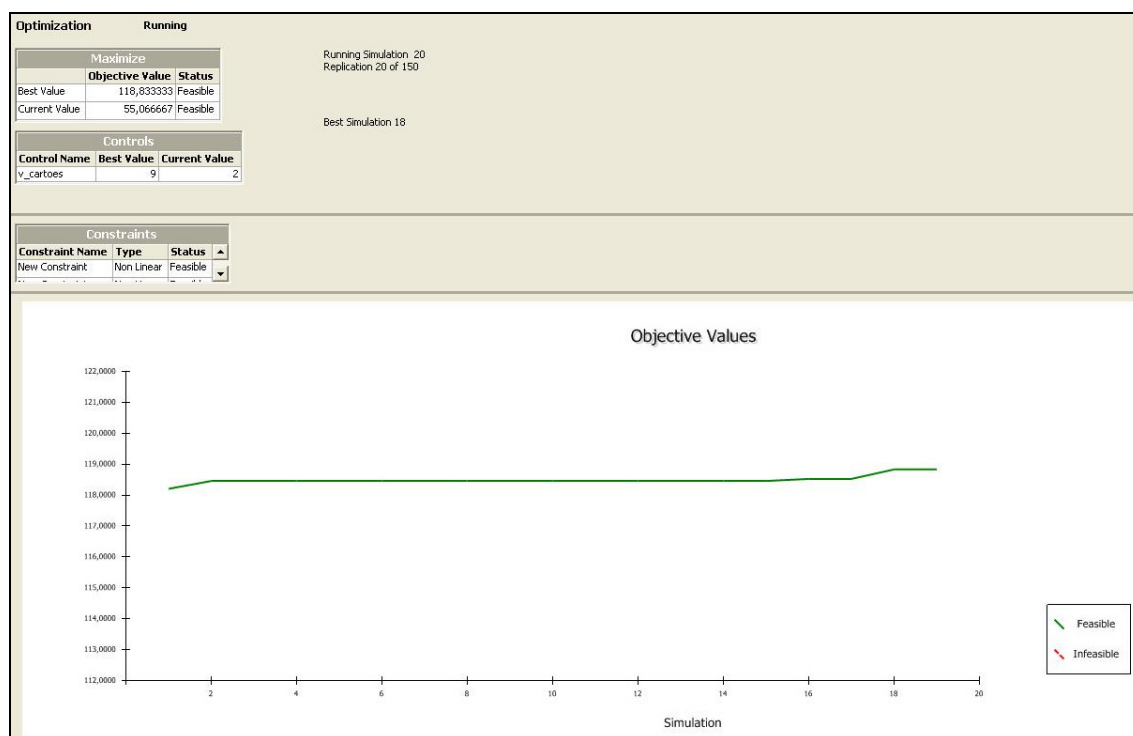


Figura 6.5 – Andamento da otimização do modelo CONWIP no OptQuest

Os 20 melhores resultados encontrados pelo OptQuest estão representados na Figura 6.6 e detalhado na Tabela 6.1, em ordem decrescente de resultado. Nota-se que a

configuração ótima para o modelo quanto ao número de cartões é de nove cartões, o qual gerou maior número médio de eixos prontos ao final do dia para as 150 replicações.

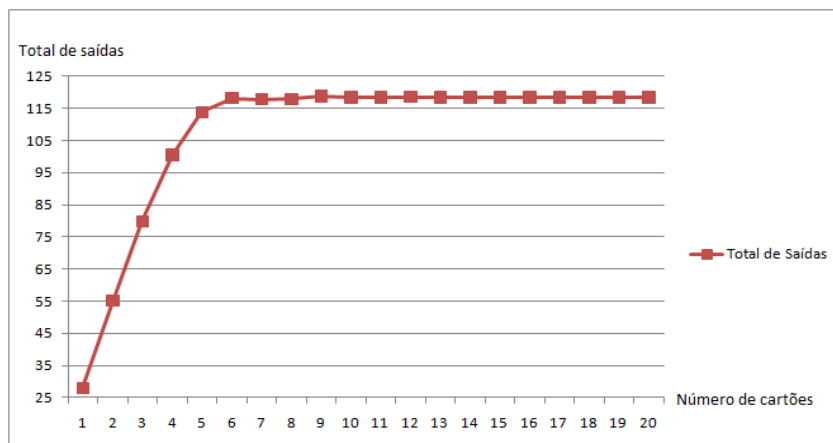


Figura 6.6 – Gráfico de comparação do total de saídas *versus* número de cartões CONWIP

Tabela 6.1 – Vinte melhores resultados obtidos na otimização do modelo CONWIP

Número de Cartões	Total de Saídas	Desvio Padrão	Viabilidade
9	118,83333333	7,660074006	viável
12	118,52666667	7,863514137	viável
11	118,46	7,904318758	viável
14	118,43333333	7,940565012	viável
16	118,43333333	7,928723305	viável
13	118,42666667	7,943885975	viável
17	118,4	8,001677676	viável
10	118,37333333	7,918669357	viável
19	118,36666667	8,092930602	viável
18	118,36666667	8,092930602	viável
15	118,35333333	8,143129576	viável
20	118,34666667	8,157005197	viável
6	118,20666667	7,380635526	viável
8	117,94	7,42319058	viável
7	117,78	7,324565635	viável
5	113,76666667	4,601453909	viável
4	100,50666667	0,967572668	viável
3	79,84666667	0,825244862	viável
2	55,06666667	0,458574779	viável
1	27,93333333	0,250279486	viável

6.2.2 Análise dos resultados do modelo CONWIP

Os resultados aqui obtidos correspondem à configuração ótima encontrada do sistema CONWIP contendo nove cartões para liberação da produção.

A Figura 6.7 mostra que o total médio de saídas do sistema foi 119 eixos, no entanto, o sistema é capaz de processar os 130 itens que constam na ordem de produção,

conforme o máximo valor obtido nas 150 observações. O tempo médio de fluxo das entidades foi de 37,3 minutos.

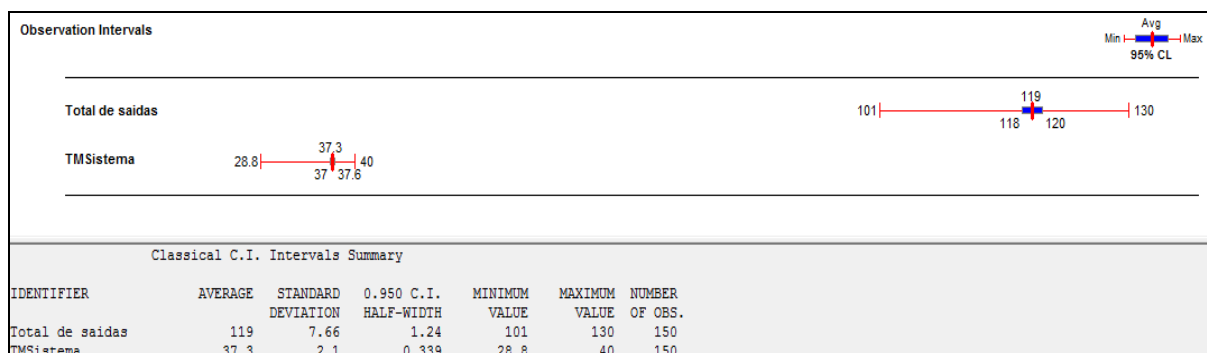


Figura 6.7 - Total médio de saídas e tempo médio de fluxo no modelo CONWIP.

Quanto à utilização dos operadores na linha de eixos traseiros, verificou-se que em nenhum momento houve a extrapolação do limite permitido na empresa de 85% do tempo. Os operadores 1 e 4 foram os que obtiveram maiores taxas de utilização, correspondendo respectivamente a 76,4% e a 76,1% (vide Figura 6.8).

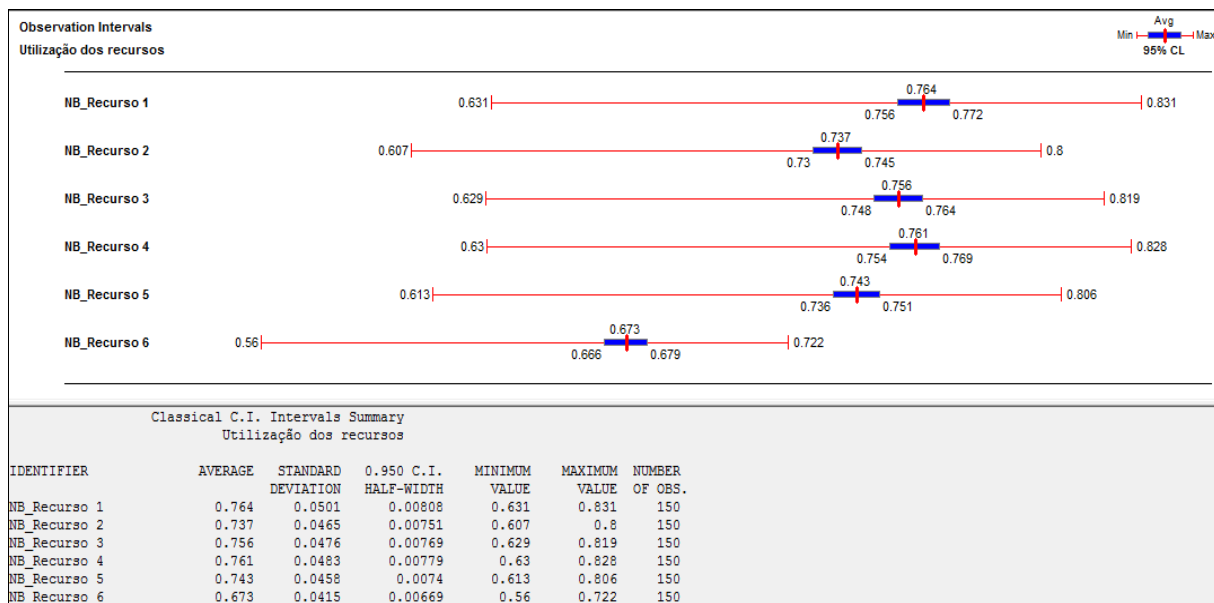


Figura 6.8 - Utilização dos operadores presentes na linha de eixos traseiros no modelo CONWIP.

Os estoques intermediários médios, ou seja, as entidades em espera nas filas para processamento em cada estação de trabalho, são expostos na Figura 6.9. Verificou-se que

as filas que possuem, em média, mais entidades em espera são da estação de trabalho 1 (1,77 entidades) e da estação 2 (0,948 entidades).

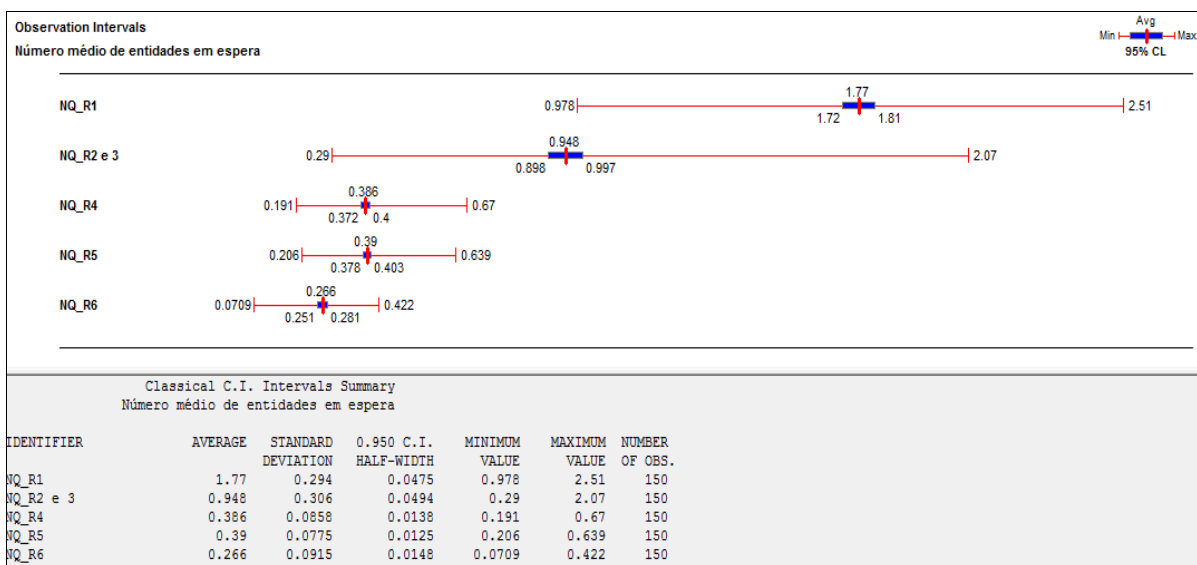


Figura 6.9 – Estoque intermediário médio por estação de trabalho no modelo CONWIP.

Na Figura 6.10 estão os tempos médios de espera das entidades por estação de trabalho. Os maiores tempos foram obtidos nas estações de trabalho 1 e 2, com os respectivos valores: 8,47 minutos e 4,47 minutos.

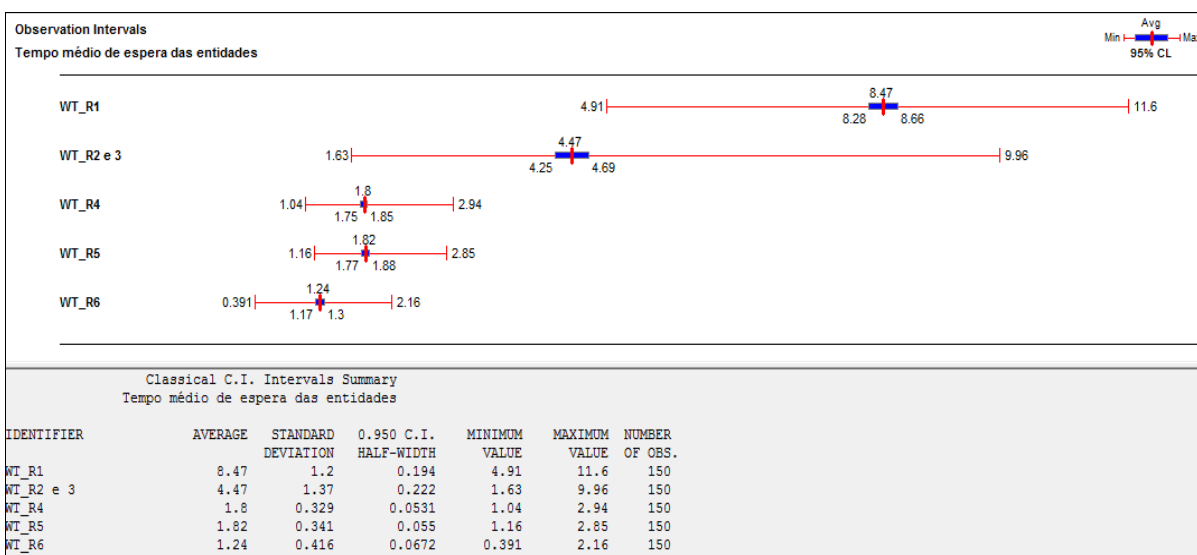


Figura 6.10 – Tempo médio de fila por estação de trabalho no modelo CONWIP.

6.3 Modelagem e simulação do *kanban*

A modelagem e simulação do *kanban* de cartão único, ou *kanban* de ordem de produção (KOP) segundo Berkley (1992) e Sarathapreeyadarishini et al. (1997), é o foco dessa seção. Marek, Elkins e Smith (2001) advogam o uso do *kanban* de cartão único devido à maior facilidade de entendimento e de implementação, e ao uso do mesmo cartão para autorizar a movimentação de material e produção. Com base no cenário atual da empresa estudada, representou-se a lógica puxada de funcionamento deste SCO, conforme apresentado no Capítulo 3.

De posse dessas informações, o modelo conceitual IDEF-SIM foi feito para conduzir o processo de modelagem no simulador utilizado. Como pode ser visto na Figura 6.11, cada estação de trabalho possui seu cartão *kanban* que é anexado ao eixo que receberá os processamentos necessários. Assim que a próxima estação de trabalho 2 (ET2) demanda um eixo, é retirado o cartão do eixo que se encontra no estoque intermediário da estação 1 (ET1). O cartão retirado retorna para o posto de cartão *kanban* da ET1 e é anexado o cartão da ET2.

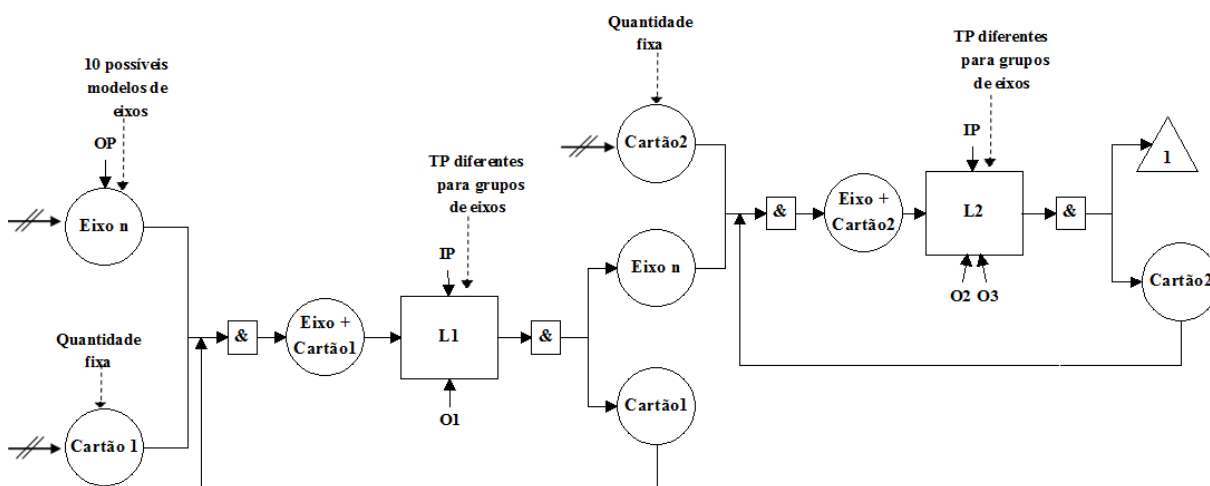


Figura 6.11 – Modelo conceitual do sistema *kanban* (continua...).

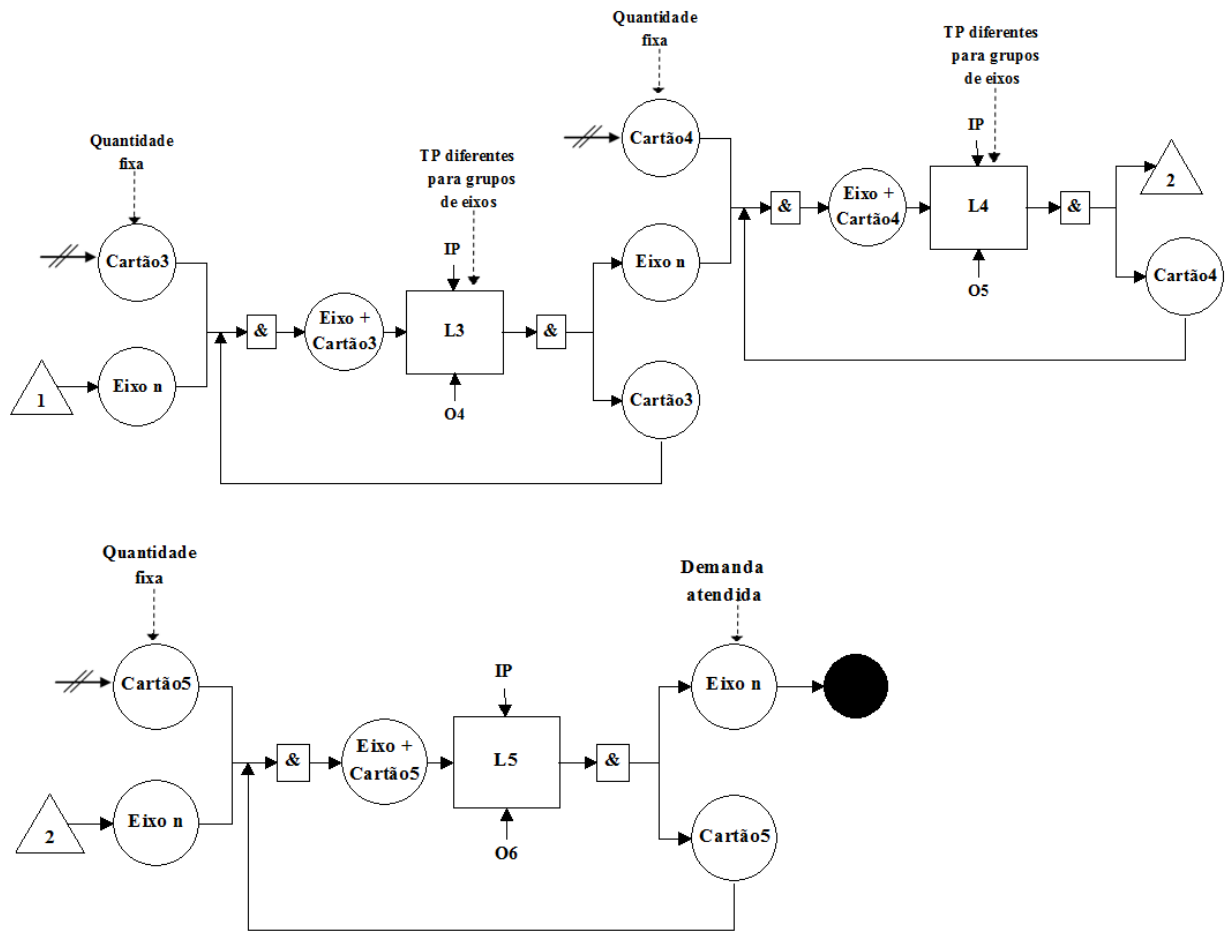


Figura 6.11 – Modelo conceitual do sistema *kanban* (...continuação).

O número de cartões foi encontrado com base na fórmula determinada por Monden (1981) e modificada por Marek, Elkins e Smith (2001). Essa também foi usada por Adamczyk e Zieliński (2008):

$$n^{\circ} \text{ de cartões} = \frac{\bar{D} \times L + w}{2a} \quad (6.2)$$

Onde:

- \bar{D} é a demanda esperada por unidade de tempo – taxa de demanda (aproximada pela taxa de chegada de 1/3,123 eixos por minuto);

- L é o *lead time* para o cliente desde o momento do pedido até a entrega (no presente estudo, o *lead time* utilizado é o de produção, pois o SCO aplicado refere-se ao sistema de cartão único aplicado em uma pequena parcela da linha de montagem na qual as linhas

fornecedoras e consumidoras seguem a lógica de produção empurrada. Assim, o tempo médio, fornecido pela empresa, para que a linha de subpainel e porta luvas receba eixo da linha de eixos traseiros é de 18,617 minutos, conforme apresentado na seção 6.2. Ressalta-se novamente que esse valor contempla somente tempos médios de processamento, devido aos dados que a empresa poderia disponibilizar para a realização pesquisa;

- w é o estoque de segurança variável assumido como 10% de $\bar{D} \times L$;
- a é a capacidade do contenedor que no presente caso é igual a 1 (número de ordens controladas por cartão *kanban*).

De acordo com Marek, Elkins e Smith (2001), a fórmula original de Monden (1981) não possui o fator 2 no denominador da fração, sendo que a fórmula foi modificada para esta aplicação, pois o mesmo cartão é usado para autorizar ao mesmo tempo a produção e a movimentação de material. Monden (1981) usa dois diferentes cartões para controlar a produção e a movimentação em um sistema *kanban*, então, o número de cartões é dobrado.

A desvantagem desse método de Monden (1981) é que ele não especifica como alocar os cartões totais encontrados em cada posto *kanban* para gerenciar WIP em cada estação de trabalho. Entretanto, pode-se usar a quantidade de cartões encontrada como o número inicial de cartões necessários por posto *kanban* em cada estação de trabalho (MAREK; ELKINS; SMITH, 2001).

Portanto, o número de cartões *kanban* a serem usados em cada estação de trabalho seria de 3,279, ou seja, 4 cartões, conforme instruções de Sipper e Bulfin Jr (1997). Esse valor inicial não afeta os resultados da pesquisa, uma vez que há a otimização para encontrar o número ideal de cartões na linha, sendo essa quantidade mais utilizada para a validação do comportamento do sistema modelado.

Destaca-se que, conforme Tandon (2008), existem várias fórmulas que são usadas para o cálculo do número de *kanbans*, sendo que a base é a fórmula de Monden (1981). Bicheno (2004) também sugere outra fórmula, na qual o *lead time* de segurança deve ser usado no lugar do estoque de segurança, com um tempo amortecedor/regulador para paradas não programadas. Neste caso, a fórmula de Monden (1981) é parcialmente alterada para:

$$n^{\circ} \text{ de cartões} = \frac{\bar{D} \times (L + ST)}{a} \quad (6.3)$$

Onde:

- ST é o tempo de segurança.

Com as informações sobre o sistema e sobre o número de cartões a serem utilizados, modelou-se no software de simulação o SCO *kanban* de cartão único. Foram realizados ajustes no cenário atual para representar a lógica desse sistema puxado. Para tanto, elaborou-se a lógica de chegada dos eixos (ordem de produção com 130 itens) e dos cartões *kanban* (quantidade fixa determinada pela fórmula) na estação de trabalho 1. Para esta parte, foram utilizados os módulos *create*, *station*, *assign*, *seize*, *match*, *route* e *dispose*. A chegada dos eixos e dos cartões *kanban* nas estações 2 a 5 seguiram a mesma forma de modelagem de produção puxada, somente sendo alterados os tipos de cartões criados, as rotas de envio dos eixos e retorno dos cartões para as respectivas estações de trabalho. Os módulos utilizados foram: *create*, *station*, *seize*, *match*, *separate*, *assign*, *route* e *dispose*. A linha ‘subpainel e porta luvas’, que caracteriza a demanda da ‘linha de eixos traseiros’, foi modelada com o uso de *create*, *station*, *hold*, *remove*, *assign*, *route* e *record*.

A Figura 6.12 expõe a vista geral da lógica de controle realizada, sendo que a lógica de processamento nas estações de trabalho (ET) está no Capítulo 5. Destaca-se que há somente a lógica de controle das ET 1, 2 e 3 e da demanda realizada, pois a lógica de controle das ET 4 e 5 são idênticas às das ET 2 e 3.

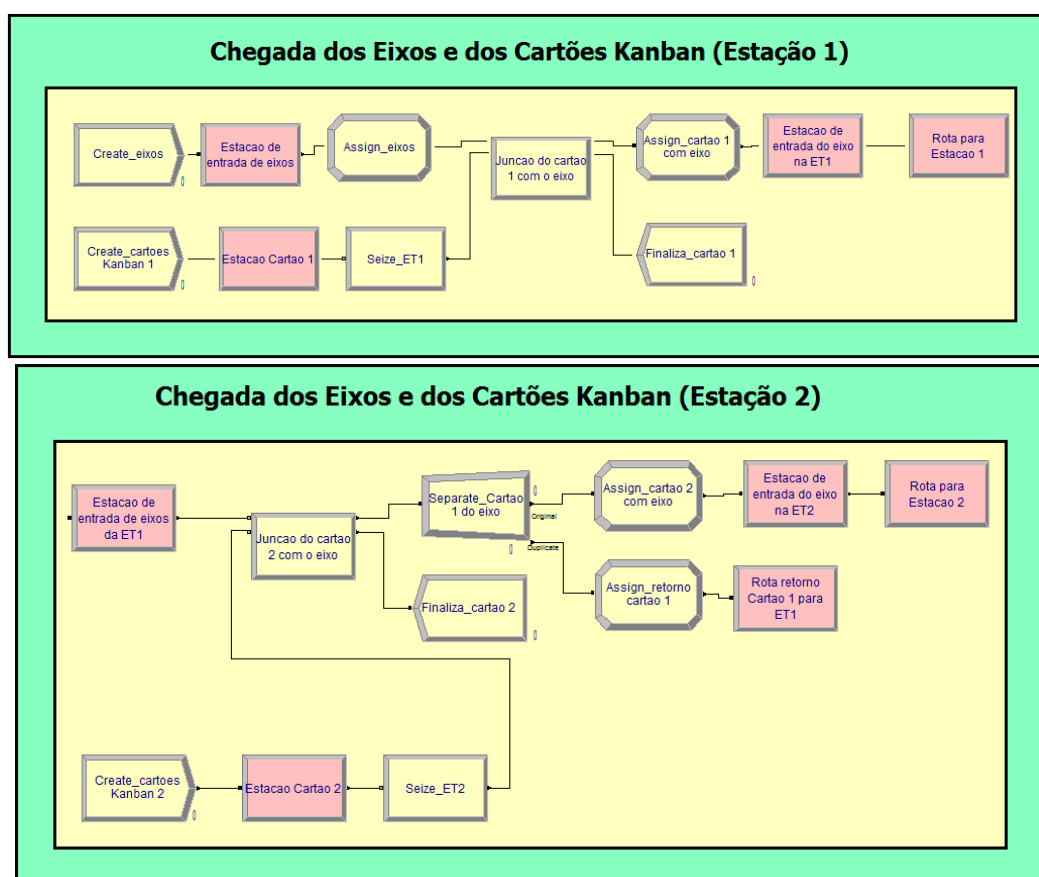


Figura 6.12 – Lógica de controle do *kanban* de cartão único (continua...).

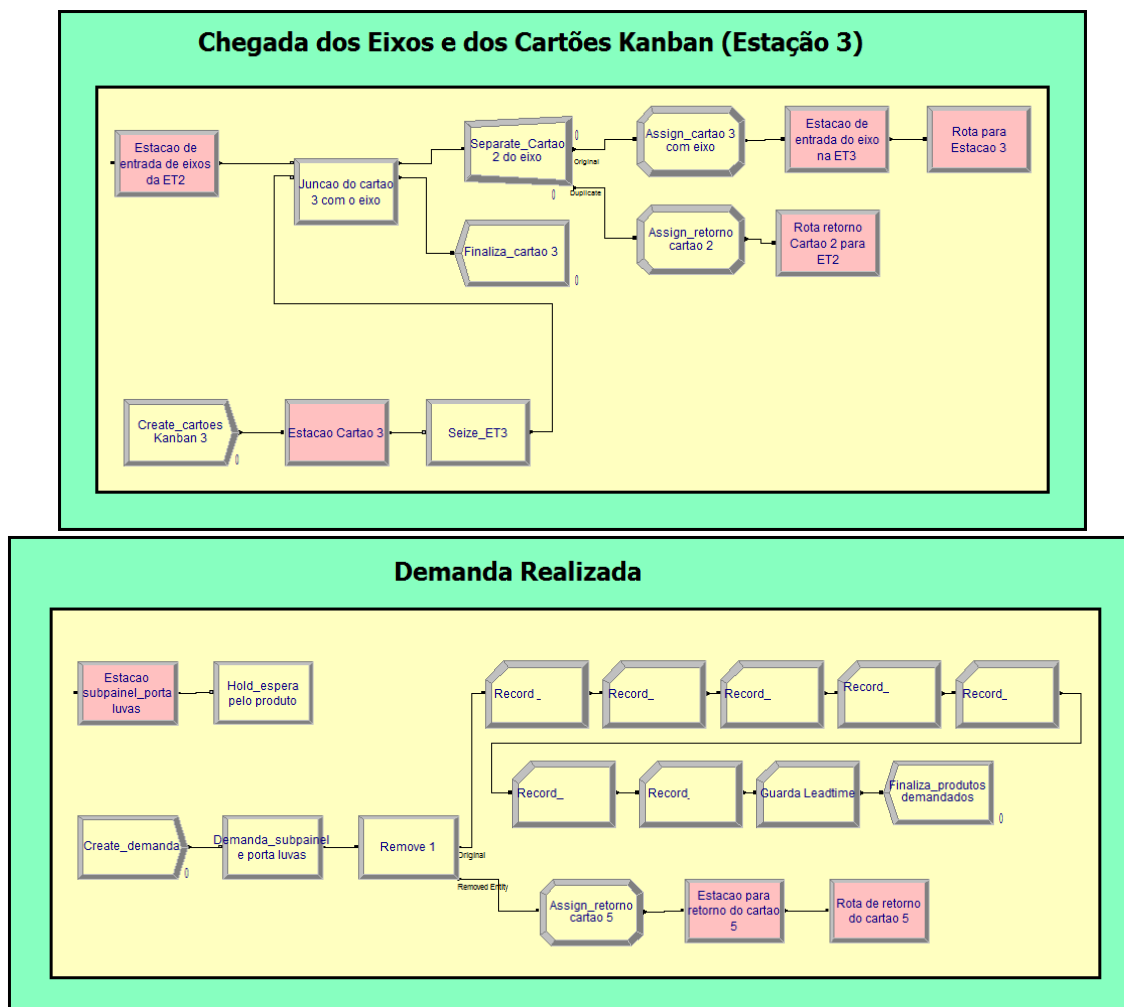


Figura 6.12 – Lógica de controle do *kanban* de cartão único (...continuação).

Detalhes da animação, em andamento durante a simulação, são apresentados na Figura 6.13. Observa-se que, na estação 2, o cartão da ET3 entra na área de espera do eixo processado na ET 2 assim que o operador da ET3 finaliza suas tarefas. Ao fixar o cartão 3 no eixo processado pela ET2, o cartão 2 retornará para o posto *kanban* da estação (localizado no canto superior esquerdo da ET2) e o eixo iniciará o processamento na ET3. Tal lógica é seguida em todas as ET. Ainda, há a representação dos estoques intermediários.

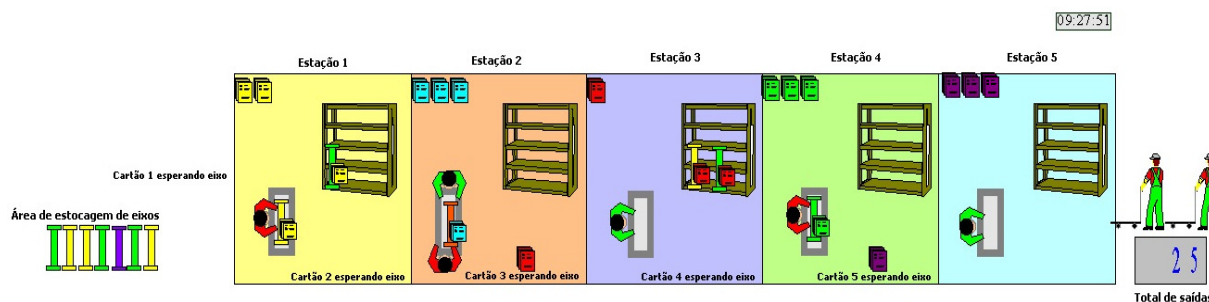


Figura 6.13 – Animação da lógica de controle *kanban* aplicado ao sistema real.

A validação do modelo programado seguiu as instruções de Sargent (2009) quanto ao rastreamento das entidades, eixos e cartões, através do modelo para verificação da lógica e da precisão.

Os semi-intervalos de confiança (*half-width*) foram encontrados por meio do *Output Analyzer* para as variáveis ‘tempo médio de fluxo’(27,5 minutos) e ‘estoque intermediário médio na estação 1’ (0,914 eixos), que são as variáveis com maior coeficiente de variação. Notou-se, vide Figura 6.14, que os semi-intervalos são menores que 10% das médias amostrais e, portanto, as 150 replicações foram satisfatórias para a precisão dos resultados.

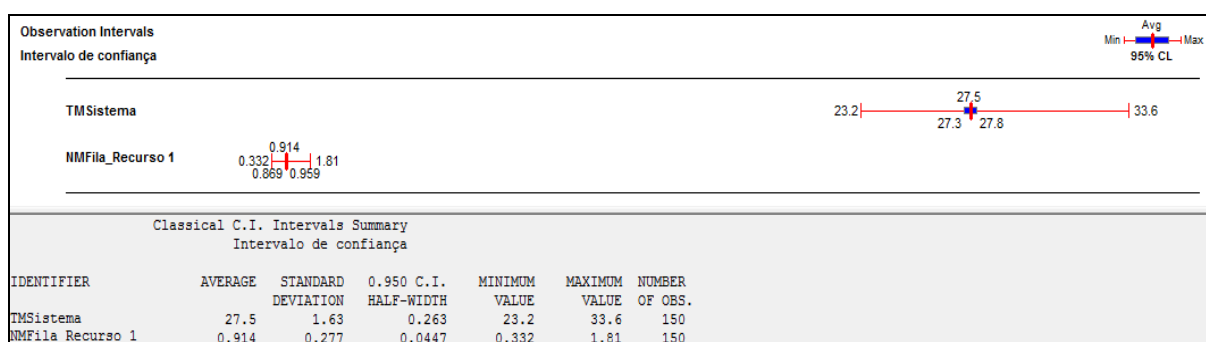


Figura 6.14 – Intervalos de confiança encontrados no modelo *kanban*

6.3.1 Otimização do número de cartões *kanban*

A otimização do número de cartões *kanban* foi procedida com uso do OptQuest[®] for Arena[®]. Para tanto, os elementos considerados para o problema foram:

- **Controles:** números de cartões *kanban* a serem utilizados em cada uma das cinco estações de trabalho. Os limites usados foram: i) limite inferior – 1 cartão; ii) valor sugerido – 4 cartões (valor encontrado por meio da fórmula); iii) limite superior – 20 cartões;
- **Restrições:** a utilização de cada operador não deve ultrapassar 85% do tempo, devido à legislação atuante;
- **Objetivo:** maximização do total de saídas do sistema, ou seja, quantidade de eixos finalizados no dia de trabalho.

O problema de otimização, portanto, é definido a seguir:

- **Objetivo:** Maximizar o total de saídas (eixos prontos ao final do dia)
- **Restrições:**
 - Utilização do Operador 1 $\leq 85\%$

- Utilização do Operador 2 $\leq 85\%$
- Utilização do Operador 3 $\leq 85\%$
- Utilização do Operador 4 $\leq 85\%$
- Utilização do Operador 5 $\leq 85\%$
- Utilização do Operador 6 $\leq 85\%$
- **Controles:** número de cartões utilizados na ET1, número de cartões utilizados na ET2, número de cartões utilizados na ET3, número de cartões utilizados na ET4 e número de cartões utilizados na ET5.

O número de replicações e de simulações para os experimentos de otimização realizados foram, respectivamente, 150 e 100, conforme recomendado por Rockwell Automation (2006) para um problema com menos de 10 controles.

A Figura 6.15 expõe a otimização em realizada no OptQuest, com as informações sobre *status* da otimização, número da simulação atual, quantidade de replicações, simulação de melhor resultado, valor da função objetivo e seu *status*, controle e restrições.

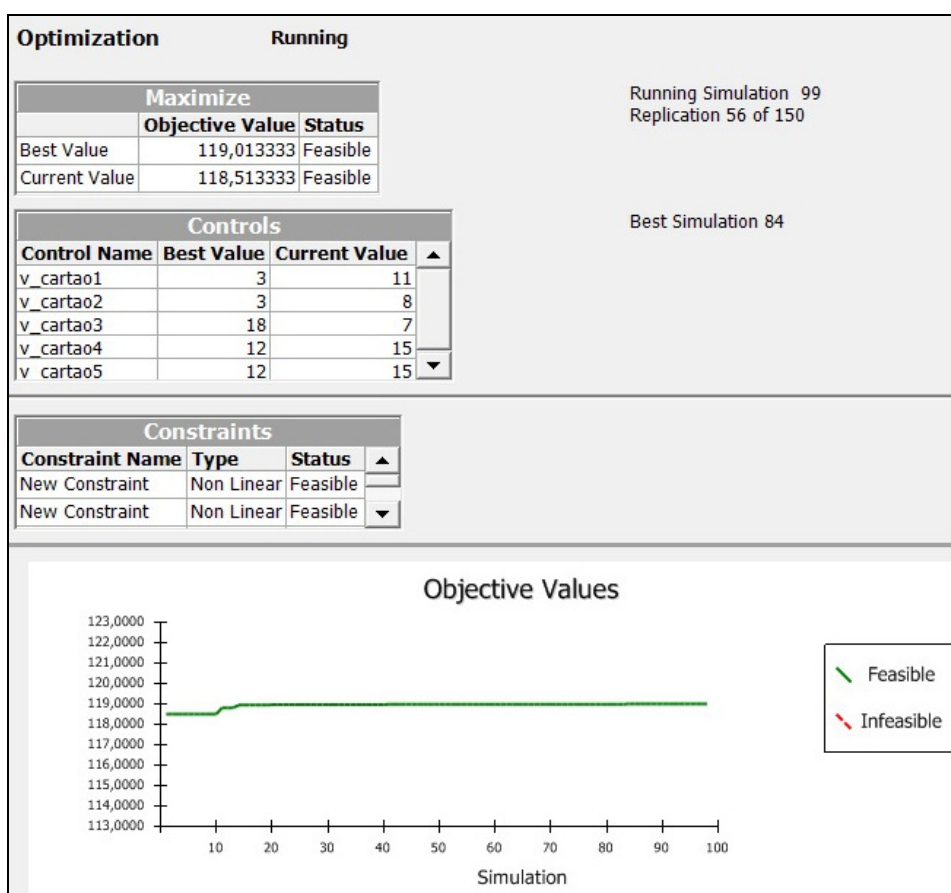


Figura 6.15 – Andamento da otimização do modelo *kanban* no OptQuest

Os vinte e cinco melhores resultados estão na Tabela 6.2, em ordem decrescente de resultado. Verificou-se que há três configuração ótimas possíveis para o modelo *kanban* gerar o mesmo total máximo de saídas (119,0133), no que concerne o número de cartões alocados em cada estação de trabalho. Para a análise de resultados, optou-se pelo uso da seguinte configuração: três cartões na ET1, três cartões na ET2, 16 cartões na ET3, 12 cartões na ET4 e 12 cartões na ET5. Essa escolha justifica-se devido ao fato de, ao testar no software de simulação essas três configurações, os resultados das medidas de desempenho foram idênticos, e a ET3 teria o menor número possível de cartões.

Ressalta-se que o pior resultado obtido nas 100 simulações foi para a configuração de um cartão para cada ET, gerando um resultado de 107,5267 eixos e desvio padrão de 2,631.

Tabela 6.2 – Vinte e cinco melhores resultados obtidos na otimização do modelo *kanban*

Número de Cartões (ET1 / ET2 / ET3 / ET4 / ET5)	Total de Saídas	Desvio Padrão	Viabilidade
3/3/18/12/12	119,0133333	7,1775065	viável
3/3/16/12/12	119,0133333	7,1775065	viável
3/3/17/12/12	119,0133333	7,1775065	viável
5/3/16/11/11	118,9933333	7,418005183	viável
5/3/20/11/12	118,9933333	7,418005183	viável
5/3/20/11/15	118,9933333	7,418005183	viável
5/3/17/11/12	118,9933333	7,418005183	viável
5/3/18/11/12	118,9933333	7,418005183	viável
5/3/18/10/12	118,9933333	7,418005183	viável
3/3/20/12/12	118,9866667	7,184983097	viável
20/3/18/4/3	118,9733333	7,37485904	viável
6/3/16/8/9	118,9533333	7,40064995	viável
6/3/15/9/12	118,9533333	7,40064995	viável
6/3/18/11/12	118,9533333	7,40064995	viável
17/3/18/7/1	118,9466667	7,377443098	viável
14/3/15/8/4	118,9466667	7,391076305	viável
13/3/18/9/5	118,9466667	7,391076305	viável
20/3/18/9/3	118,9466667	7,391076305	viável
19/3/18/6/4	118,9466667	7,391076305	viável
15/3/18/7/4	118,9466667	7,391076305	viável
12/3/18/9/4	118,9466667	7,391076305	viável
14/3/18/9/3	118,9466667	7,391076305	viável
15/3/5/7/14	118,9466667	7,391076305	viável
9/3/17/10/8	118,9466667	7,391076305	viável
19/3/18/11/15	118,9466667	7,391076305	viável

6.3.2 Análise dos resultados do modelo *kanban*

Com base na configuração ótima do número de cartões *kanban* para cada estação de trabalho, os resultados a seguir foram encontrados. O total médio de saídas do

sistema foi de 119 eixos, com um máximo de 130 itens durante as 150 replicações (vide Figura 6.16). Ainda, o tempo médio de fluxo foi 26,7 minutos.

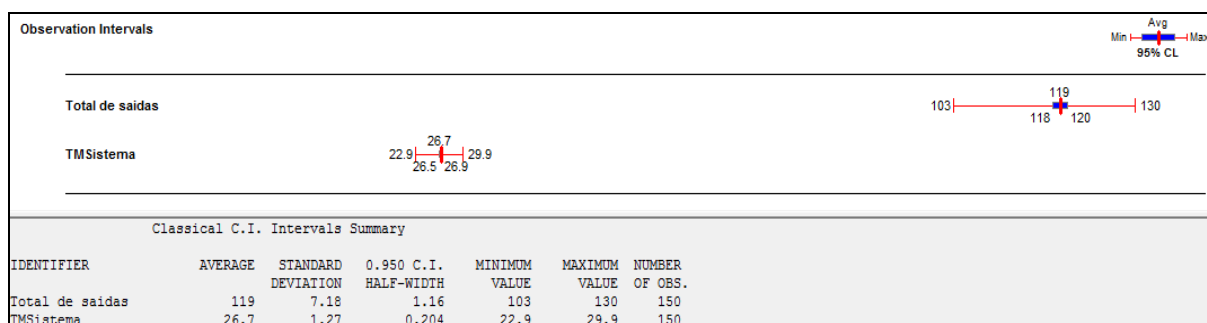


Figura 6.16 – Total médio de saídas e tempo médio de fluxo no modelo *kanban*

A Figura 6.17 expõe a utilização dos seis operadores da linha de eixos traseiros. Observa-se que o limite de 85%, imposto na empresa, não foi ultrapassado em nenhum momento das observações efetuadas. Os operadores 1 e 4 continuaram com as maiores taxas de utilização, respectivamente, 77,7% e 77,4%.

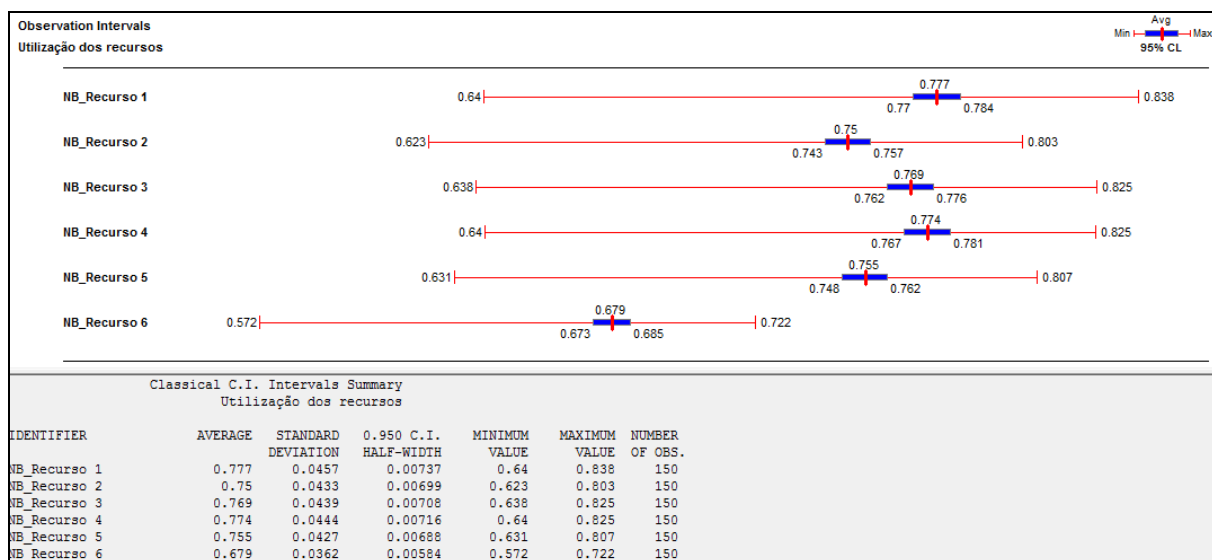


Figura 6.17 – Utilização dos operadores presentes na linha de eixos traseiros no modelo *kanban*

O estoque intermediário médio formado na estação de trabalho 1 é o maior de todas as estações (0,815 entidades), como pode ser observado na Figura 6.18. No entanto, o valor máximo atingido nas 150 replicações foi da estação 5 (3,27 entidades). Salienta-se que, neste modelo, o estoque intermediário (EI) é formado na estação após o processamento. A entidade aguarda a liberação do operador da próxima estação para sair do estoque. Esse

modelo se difere, dos modelos anteriormente mostrados, quanto ao posicionamento do EI, os quais eram formados na estação antes de receberem o processamento.

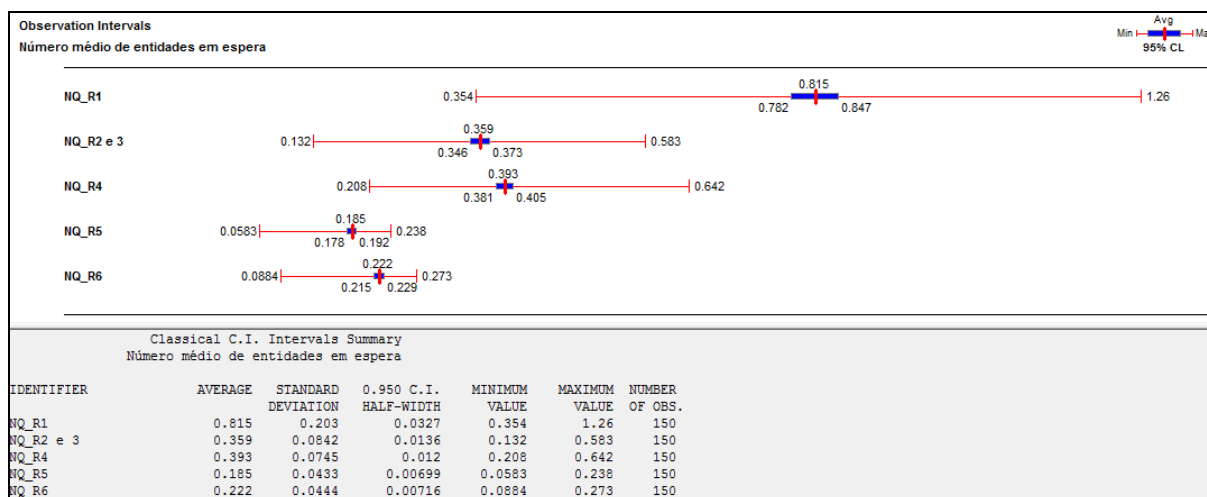


Figura 6.18 – Estoque intermediário médio por estação de trabalho no modelo *kanban*

Quanto ao tempo médio de fila, os menores valores foram das estações de trabalho 4 e 5, respectivamente, 0,722 min e 0,12 min.

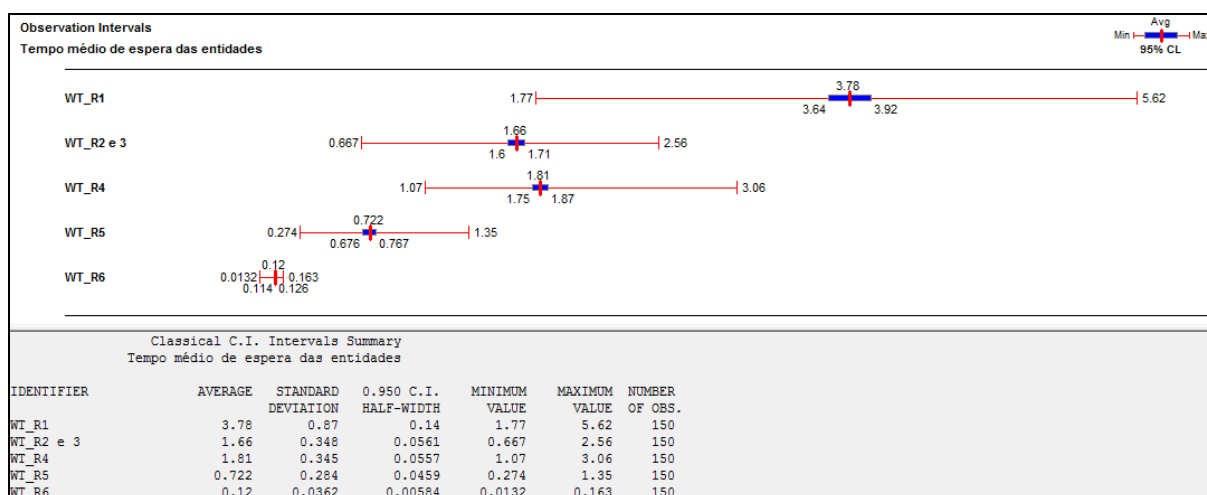


Figura 6.19 – Tempo médio de fila por estação de trabalho no modelo *kanban*

6.4 Modelagem e simulação do TBC

O TBC foi modelado de acordo com as considerações de Bonvik, Couch e Gershwin (1997) para um híbrido *Kanban-CONWIP*, tratadas no Capítulo 3. Portanto, para que o eixo seja direcionado para a primeira estação de trabalho, há a união do cartão

CONWIP com o cartão *kanban* desta estação. O cartão CONWIP seguirá unido ao eixo até a quinta estação, onde o cartão retornará ao início da linha assim que a demanda for satisfeita. Na ET5, nenhum cartão *kanban* é necessário para sincronizar a produção, uma vez que a quantidade de material em toda a linha não excederá a quantidade de estoque permitido pelo CONWIP (BONVIK, COUCH; GERSHWIN, 1997).

A partir dessas informações, fez-se o modelo conceitual do híbrido *Kanban-CONWIP* segundo o IDEF-SIM (vide capítulo 5), como pode ser observado na Figura 6.20. A validação deste também seguiu as orientações de Sargent (2009), tomando o cuidado para que estivessem presentes a teoria e suposições do SCO TBC, como apresentado no Capítulo 3.

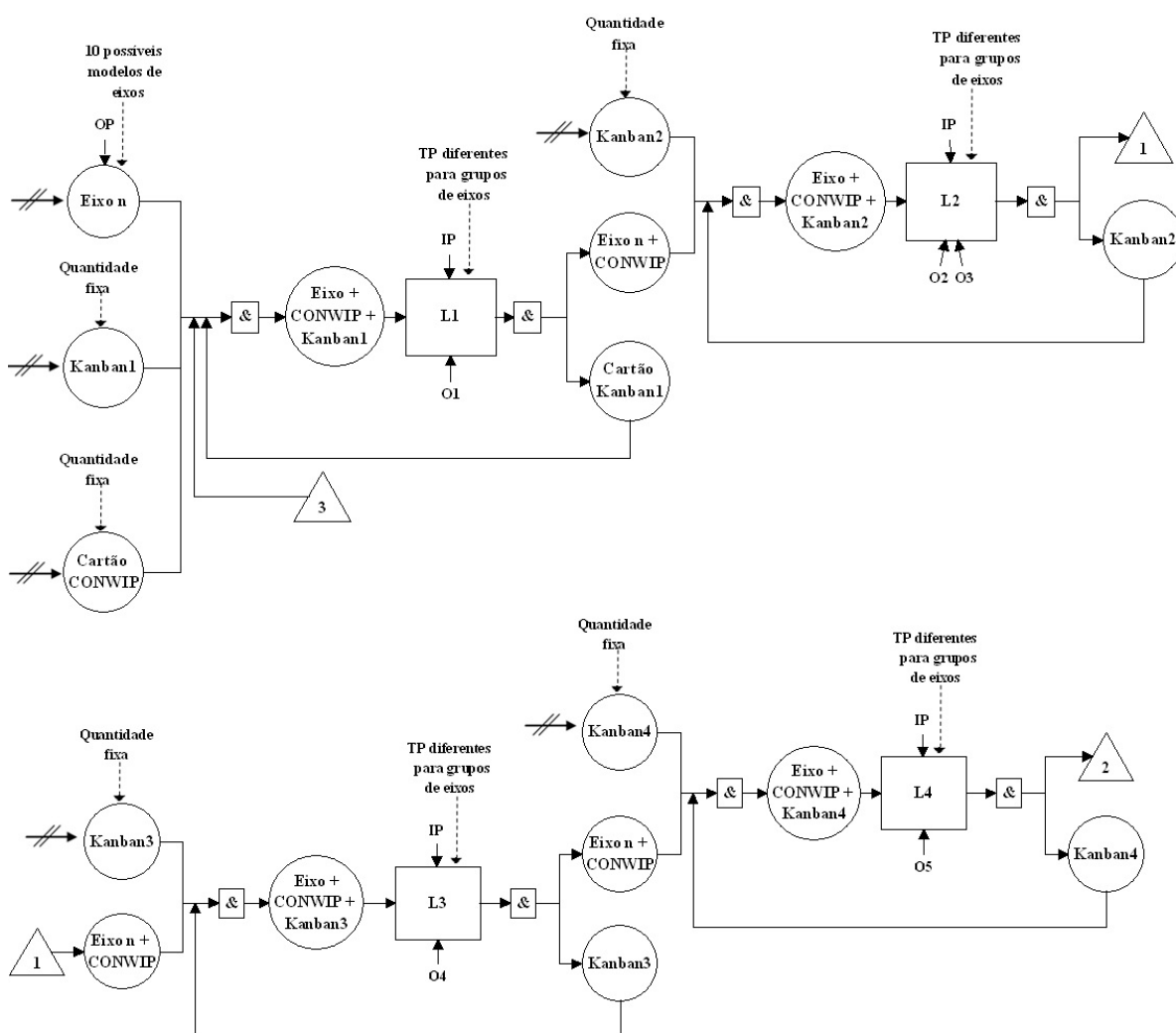


Figura 6.20 – Modelo conceitual do sistema TBC (continua...)

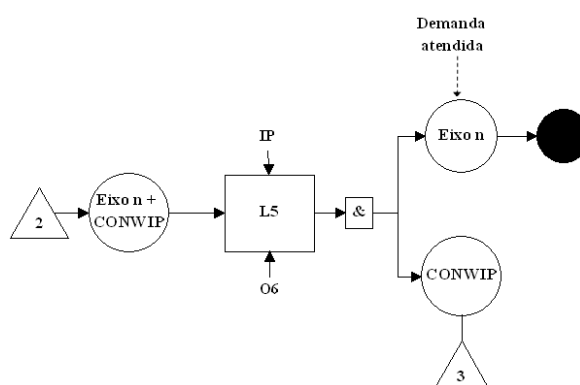


Figura 6.20 – Modelo conceitual do sistema TBC (...continuação)

A quantidade de cartões CONWIP e *kanban* utilizada no sistema foi calculada por meio das fórmulas apresentadas nas seções 6.2 e 6.3. Portanto, para a validação do modelo programado no software Arena, foram consideradas as quantidades de seis cartões CONWIP e quatro cartões *kanban* para a ET1, ET2, ET3 e ET4.

A Figura 6.21 apresenta a vista geral da lógica de controle do TBC. Para a chegada dos eixos, dos cartões CONWIP e *Kanban* (da estação de trabalho1) foram utilizados os módulos *create*, *assign*, *station*, *seize*, *match*, *route* e *dispose*. As estações 2, 3 e 4 possuem a mesma forma de programação, somente mudando os cadastros das estações anteriores e posteriores, para o recebimento e envio de entidades, e também na criação do cartão de cada estação. Devido a isso, a figura expõe somente a modelagem da ET2, na qual foram utilizados os módulos *station*, *match*, *seize*, *separate*, *assign*, *route* e *dispose*. Na ET5, que possui somente o cartão CONWIP para a sincronização da produção, usaram-se os módulos *station*, *seize*, *separate*, *assign* e *route*. Para a realização da demanda, que é a linha de subpainel e porta luvas, usufruiu-se dos módulos *create*, *station*, *hold*, *remove*, *assign*, *route*, *record* e *dispose*.

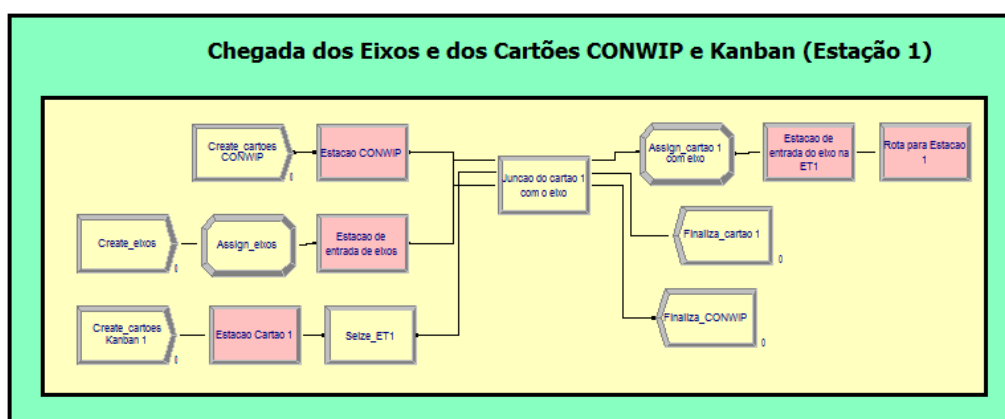


Figura 6.21 – Lógica de controle do TBC (continua...)

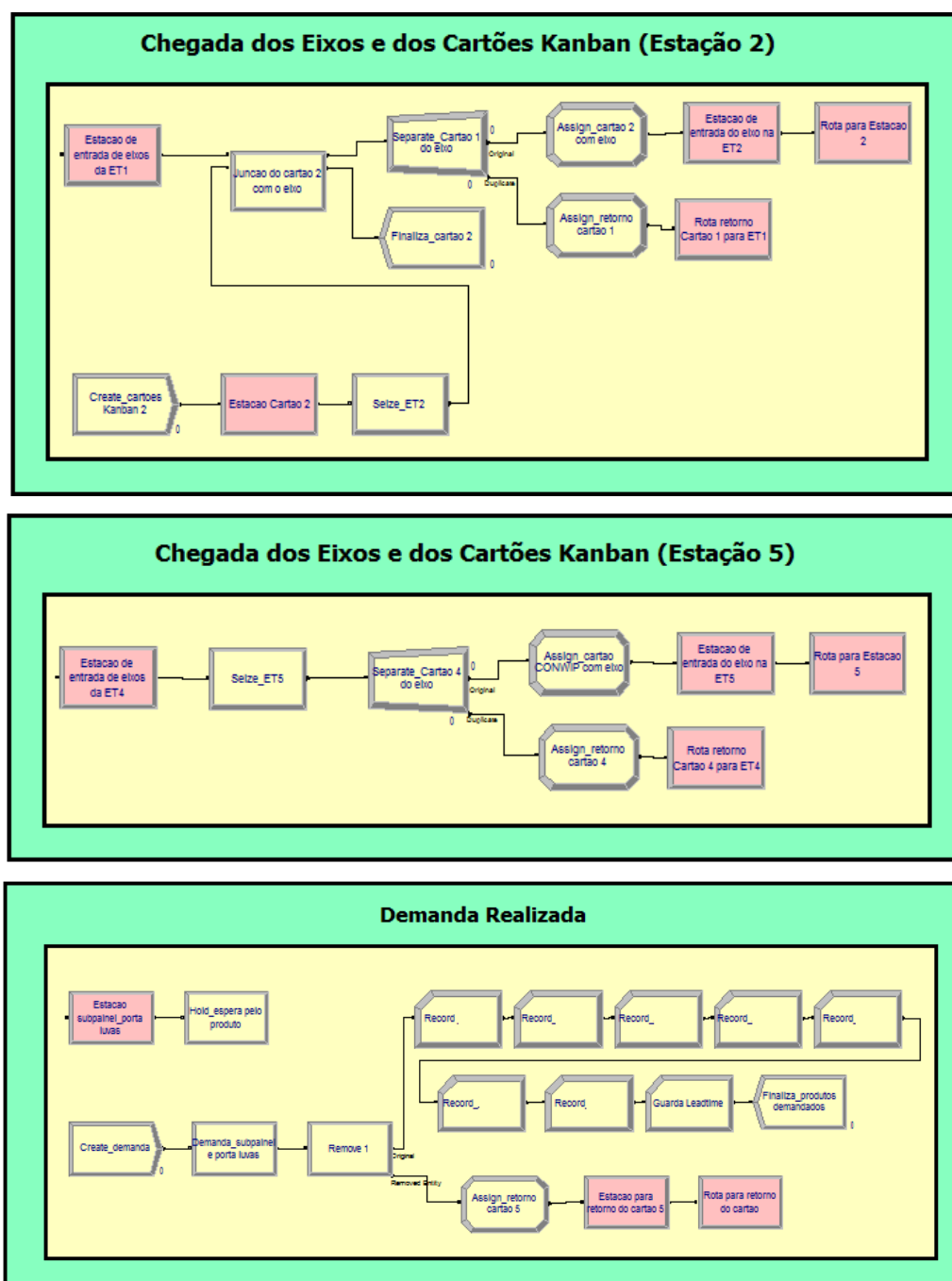


Figura 6.21 – Lógica de controle do TBC (...continuação)

Alguns detalhes da animação efetuada, em conjunto com o fluxograma desenvolvido, estão na Figura 6.22. Como pode ser notado, o eixo entra na ET1 após a fixação do cartão CONWIP com o *kanban* dessa estação, que é liberado somente quando o Operador 1 estiver livre. Verifica-se que o cartão CONWIP atravessa todo o sistema e somente é liberado, para o posto localizado no início da linha, quando a demanda é satisfeita.

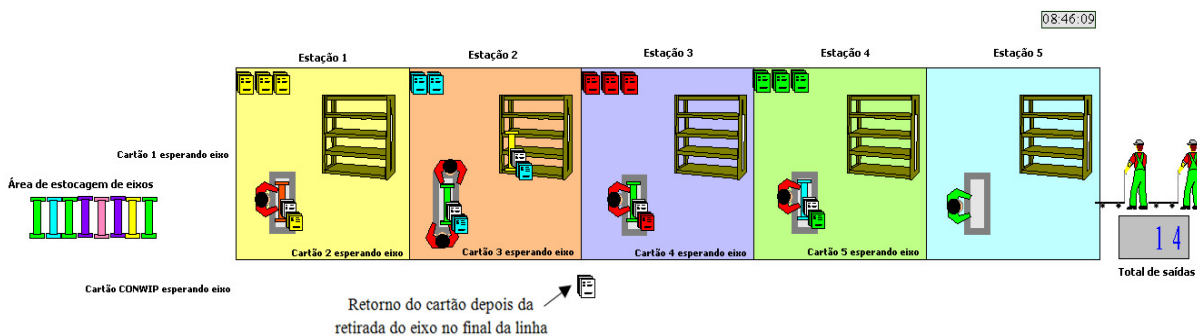


Figura 6.21 – Animação da lógica de controle do TBC aplicado ao sistema real

Com isso, foi realizado o rastreamento das entidades (eixos, cartões CONWIP e *kanban*) através do modelo para validação deste segundo Sargent (2009). Averiguou-se que a precisão necessária e a lógica do sistema estavam corretas. Ainda, foi confirmado por meio do *Output Analyzer*, que as 150 replicações são satisfatórias para garantir que os semi-intervalos de confiança (*half-width*) sejam menores que 10% das médias amostrais (vide Figura 6.22). Para tanto, foram avaliadas as mesmas variáveis dos outros modelos (‘tempo médio de fluxo’, com 23 minutos, e ‘estoque intermediário médio na estação 1’, com 2,69 eixos), pois estas possuem o maior coeficiente de variação.

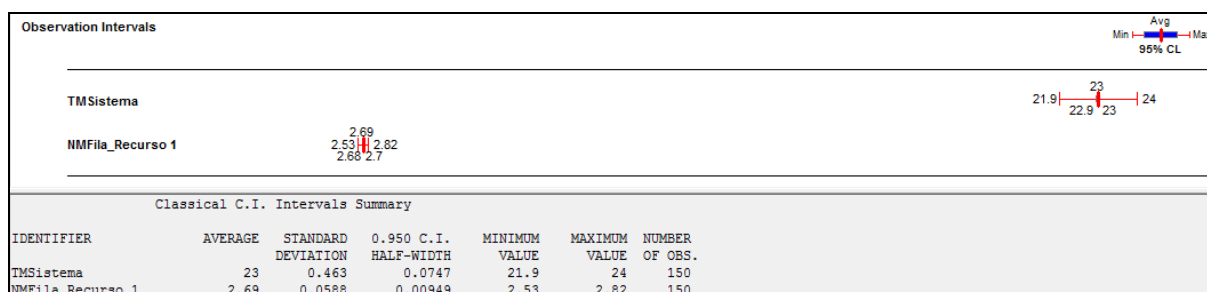


Figura 6.22 – Intervalos de confiança para as variáveis ‘tempo médio de fluxo’ e ‘estoque intermediário médio na estação 1’

6.4.1 Otimização do número de cartões CONWIP e *kanban*

Para a determinação do número de cartões CONWIP e *kanban* a serem utilizados no sistema TBC, também foi utilizado o OptQuest for Arena. Os controles, restrições e objetivo considerados no problema foram:

- **Controles:** número de cartões CONWIP e números de cartões *kanban* a serem utilizados em cada uma das quatro primeiras estações de trabalho. Os limites usados para o cartão CONWIP foram: i) limite inferior – 1 cartão; ii) valor sugerido – 6 cartões (valor

encontrado por meio da fórmula); iii) limite superior – 20 cartões. Para os cartões *kanban* foram: i) limite inferior – 1 cartão; ii) valor sugerido – 4 cartões (valor encontrado por meio da fórmula); iii) limite superior – 20 cartões;

- Restrições: a utilização de cada operador não deve ultrapassar 85% do tempo;
- Objetivo: maximização do total de saídas do sistema ao final do dia de trabalho.

Deste modo, o problema de otimização foi definido, a saber:

- Objetivo: Maximizar o total de saídas (eixos prontos ao final do dia)
- Restrições:
 - Utilização do Operador 1 $\leq 85\%$
 - Utilização do Operador 2 $\leq 85\%$
 - Utilização do Operador 3 $\leq 85\%$
 - Utilização do Operador 4 $\leq 85\%$
 - Utilização do Operador 5 $\leq 85\%$
 - Utilização do Operador 6 $\leq 85\%$
- Controles: número de cartões CONWIP utilizados no sistema, número de *kanbans* atribuídos na ET1, número de cartões atribuídos na ET2, número de cartões atribuídos na ET3 e número de cartões atribuídos na ET4.

Da mesma forma que nos modelos anteriores, seguiram-se as recomendações da Rockwell Automation (2006) para um problema com menos de 10 controles. Assim, considerou-se 100 simulações com 150 replicações (para garantir determinada precisão dos resultados). A Figura 6.23 mostra o andamento da otimização no OptQuest.

As configurações ótimas encontradas para o presente modelo estão na Tabela 6.3. Nota-se que os dois primeiros resultados encontrados geram um total máximo de saídas de 119,0133 eixos. Uma vez que ambos os resultados são idênticos também para as quantidades de cartões CONWIP e cartões *kanban* nas ET1, ET3 e ET4, optou-se utilizar a configuração com menor quantidade de cartões na ET2 (12/3/16/6/2).

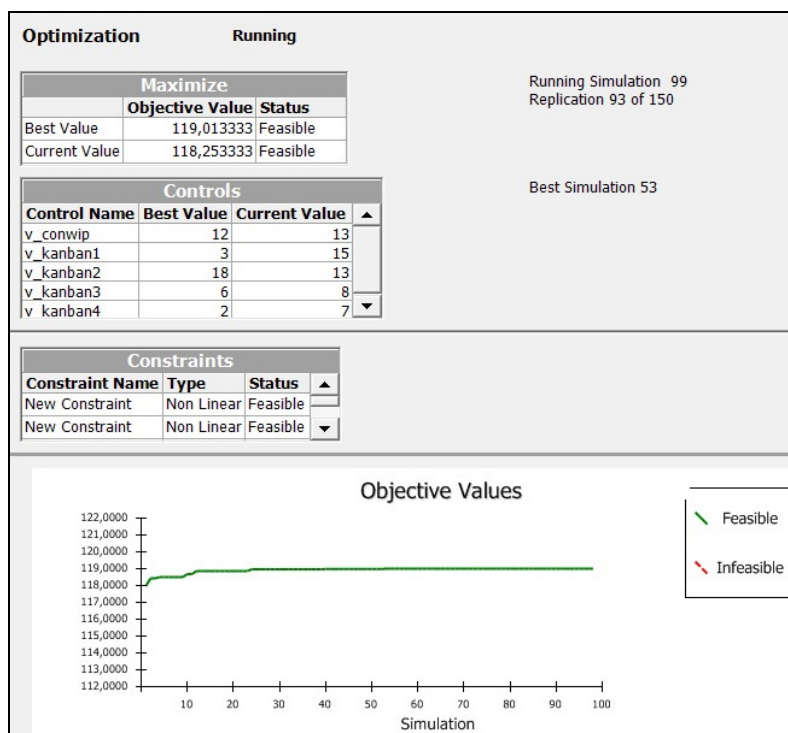


Figura 6.23 – Andamento da otimização do modelo TBC no OptQuest

Tabela 6.3 – Vinte e cinco melhores resultados obtidos na otimização do modelo TBC

Número de Cartões (CONWIP/Kanban ET1 /Kanban ET2/ Kanban ET3 /Kanban ET4)	Total de Saídas	Desvio Padrão	Viabilidade
12/3/16/6/2	119,0133333	7,4157339	viável
12/3/18/6/2	119,0133333	7,4157339	viável
12/3/19/6/2	118,9866667	7,4229706	viável
12/3/20/6/2	118,9866667	7,422970576	viável
12/3/15/6/2	118,9866667	7,422970576	viável
12/3/16/6/6	118,9733333	7,418412307	viável
12/3/18/6/4	118,9733333	7,418412307	viável
12/3/17/6/5	118,9733333	7,418412307	viável
12/3/18/6/3	118,9733333	7,418412307	viável
12/3/16/6/3	118,9733333	7,418412307	viável
12/3/17/6/4	118,9733333	7,418412307	viável
12/3/17/6/6	118,9733333	7,418412307	viável
12/3/16/6/7	118,9733333	7,418412307	viável
12/3/18/6/7	118,9733333	7,418412307	viável
10/3/20/6/2	118,96	7,496648021	viável
18/18/2/18/18	118,96	7,656974712	viável
12/3/19/6/3	118,9466667	7,425501738	viável
18/18/3/18/18	118,9466667	7,391076305	viável
12/3/5/6/19	118,9466667	7,425501738	viável
16/3/18/9/2	118,88	7,685006757	viável
9/15/2/4/10	118,8733333	7,721926131	viável
16/3/6/8/16	118,84	7,68689288	viável
14/3/18/9/3	118,8333333	7,709853076	viável
13/3/19/6/6	118,8266667	7,649842448	viável
16/3/5/9/19	118,8133333	7,69326967	viável

6.4.2 Análise dos resultados do modelo TBC

Os resultados obtidos, a partir da configuração ótima do número de cartões CONWIP e *kanban*, são detalhados a seguir. Na Figura 6.24 estão o total médio de saídas (119 eixos prontos entregues para a linha de subpainel e porta luvas) e o tempo médio de fluxo no sistema no modelo TBC (26,5 minutos).

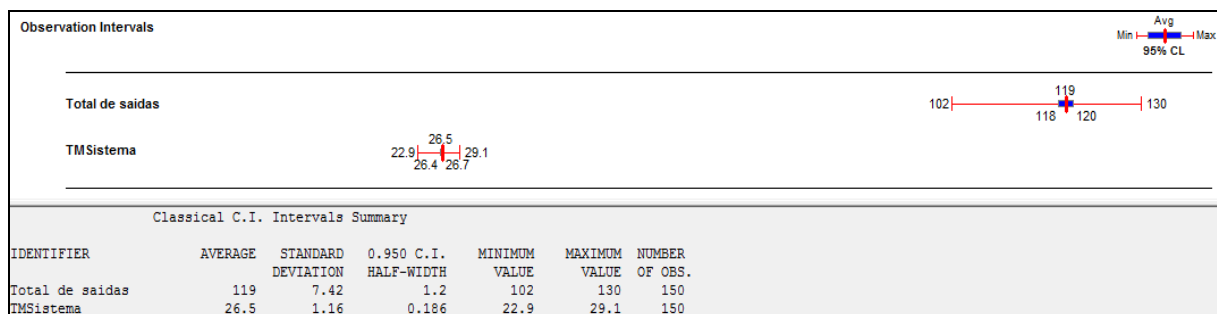


Figura 6.24 – Total médio de saídas e tempo médio de fluxo no modelo TBC

Como pode ser observado na Figura 6.25, a utilização dos operadores atribuídos na linha não ultrapassa o máximo admitido de 85%. Os operadores 1 e 4 continuam com as maiores taxas de utilização, sendo respectivamente, 77% e 76,7%.

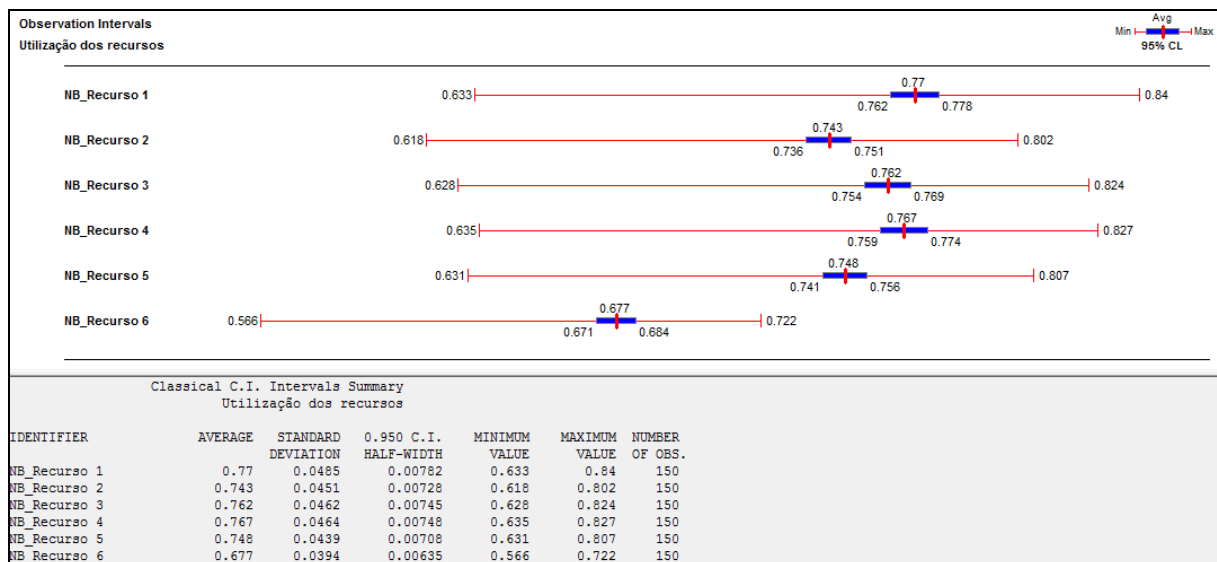


Figura 6.25 – Utilização dos operadores presentes na linha de eixos traseiros no modelo TBC

Quanto ao estoque intermediário médio, houve maior formação na ET1 (0,768 eixos) e na ET3 (0,402 eixos), como pode ser notado na Figura 6.26. O tamanho máximo dos

estoques gerados nessas estações foram, respectivamente, 1,1 eixos e 0,822 eixos. Já na Figura 6.27, observa-se que o maior tempo médio de fila está na estação 1 (3,61 min).

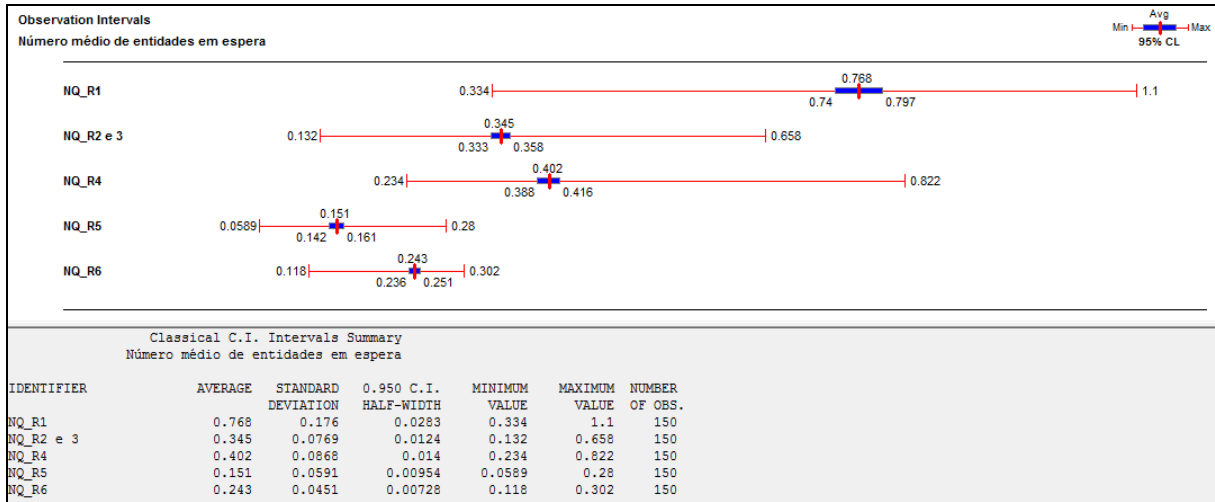


Figura 6.26 – Estoque intermediário médio por estação de trabalho no modelo TBC

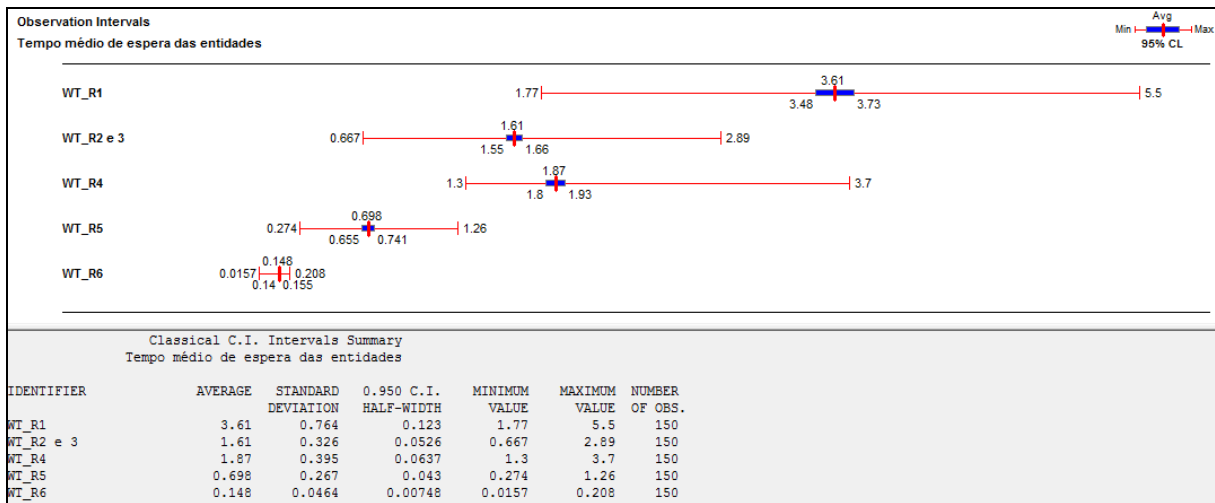


Figura 6.27 – Tempo médio de fila por estação de trabalho no modelo TBC

6.5 Análise dos resultados obtidos nos SCO simulados

Para comparação dos resultados obtidos nos modelos dos cenários ‘Atual’, CONWIP, *kanban* e TBC, foi realizada a análise de variância com um fator (*One-Way ANOVA*) juntamente com o método *post hoc* de comparações múltiplas de Scheffé, por meio do Output Analyzer[®] (ferramenta integrada ao software ARENA). Os resultados desses testes estão no APÊNDICE A. Segundo Chung (2003), dentre os processos de análises estatísticas que podem ser utilizadas em sistemas terminais (caso dessa tese) para comparação de

modelos são: Abordagem de Intervalo de Confiança (mais usado para comparação entre dois modelos), e ANOVA (mais usado para comparações entre três ou mais modelos). A ANOVA foi efetuada devido à possibilidade de uso do Teorema do Limite Central (T.L.C.) e, com uso de uma amostra grande o suficiente, admitir a normalidade, pois neste caso a violação desse pressuposto não possui sérias consequências (LOURENÇO, 2004). O método de comparações múltiplas de Scheffé foi usado por ser mais robusto a violações dos pressupostos de normalidade e igualdade de variâncias (SCHEFFÉ, 1953; LOURENÇO, 2004).

Portanto, as hipóteses testadas nessa seção e no Capítulo 7 foram:

- H_0 : as médias são iguais;
- H_1 : nem todas as médias são iguais.

Assim, quando H_0 for corroborada, indica que não há diferença significativa entre as médias dentro do intervalo de confiança de 95% e quando H_0 for refutada, indica que as médias são diferentes dentro do intervalo de confiança de 95% (WALPOLE et al., 2009).

Em resumo, os principais resultados obtidos nos capítulos 5 e 6 são apresentados nas Tabelas 6.4, 6.5 e 6.6. Quanto ao total médio de saídas, o melhor sistema seria o empurrado, que representa o cenário atual da empresa. Os demais sistemas obtiveram as mesmas médias, sendo que o *kanban* obteve o melhor valor mínimo de todos, ou seja, em uma situação desfavorável quanto às chegadas de eixos no início da linha, retirada destes na ET5 pela linha de subpainel/porta luvas e tempos de processamento, esse SCO ainda conseguiria produzir mais eixos do que os demais sistemas. Em uma situação favorável, todos os sistemas conseguiriam produzir os 130 eixos que constam na ordem de produção (vide Tabela 6.4).

No que diz respeito ao tempo médio de fluxo, o TBC e o *kanban* possuem os melhores valores médios, como pode ser notado na Tabela 6.4, sendo que as médias obtidas foram consideradas iguais pelo método de Scheffé (vide APRÊNDICE A). O maior resultado foi do sistema empurrado (cenário atual), 76,7 minutos, valor este influenciado pela fila inicial que atualmente é praticada na estação de trabalho 1 da linha de eixos traseiros e pela lógica do sistema empurrado, que permite formação de altos estoques intermediários.

Tabela 6.4 – Resumo dos resultados obtidos para total de saídas e tempo de fluxo

SCO / Medida de desempenho		Cenário atual (sistema empurrado)	CONWIP	Kanban	TBC
Total de saídas (número de eixos)	Média	123	119	119	119
	Mínimo	101	101	103	102
	Máximo	130	130	130	130
Tempo de fluxo (minutos)	Média	76,7	37,3	26,7	26,5
	Mínimo	34,3	28,8	22,9	22,9
	Máximo	130	40	29,9	29,1

A Tabela 6.5 apresenta o resumo dos resultados obtidos quanto à utilização dos operadores presentes na linha estudada. Verificou-se que em nenhum momento os sistemas analisados ultrapassaram o limite máximo permitido de 85% de utilização dos operadores.

Tabela 6.5 – Resumo dos resultados obtidos para utilização dos operadores

Operador	Tipo de sistema /Valores	Cenário atual (sistema empurrado)	CONWIP	Kanban	TBC
1	Média	78,0%	76,4%	77,7%	77,0%
	Mínimo	63,2%	63,1%	64,0%	63,3%
	Máximo	83,3%	83,1%	83,8%	84,0%
2	Média	75,3%	73,7%	75,0%	74,3%
	Mínimo	61,1%	60,7%	62,3%	61,8%
	Máximo	80,3%	80,0%	80,3%	80,2%
3	Média	77,2%	75,6%	76,9%	76,2%
	Mínimo	62,2%	62,9%	63,8%	62,8%
	Máximo	82,3%	81,9%	82,5%	82,4%
4	Média	77,7%	76,1%	77,4%	76,7%
	Mínimo	63,2%	63,0%	64,0%	63,5%
	Máximo	82,5%	82,8%	82,5%	82,7%
5	Média	75,8%	74,3%	75,5%	74,8%
	Mínimo	61,9%	61,3%	63,1%	63,1%
	Máximo	80,6%	80,6%	80,7%	80,7%
6	Média	68,6%	67,3%	67,9%	67,7%
	Mínimo	56,1%	56,0%	57,2%	56,6%
	Máximo	72,2%	72,2%	72,2%	72,2%

Os estoques intermediários e tempos de fila obtidos estão na Tabela 6.6. Observou-se que os menores valores médios dos estoques intermediários e de tempo de fila foram obtidos pelos sistemas *kanban* e TBC. Como esperado, os maiores estoques intermediários foram formados pelo sistema empurrado.

Portanto, grosso modo, observou-se que o sistema atual da empresa (empurrado) gerou o maior total médio de saídas e que os sistemas *kanban* e TBC possuíram menores estoques intermediários e tempos de fluxo.

Como o sistema empurrado apresentou total médio de saídas maior, resolveu-se tornar o total de saídas iguais para todos os sistemas para verificação do impacto nas demais medidas de desempenho. Para isso, atribuiu-se o total de saídas em 91 itens (70% do total da ordem de produção), o qual gera desvio-padrão zerado para todos os SCO, como pode ser observado na Tabela 6.7. Com isso, nas 150 replicações efetuadas para cada sistema, em todas foram produzidos sempre 91 itens. Essa análise foi realizada para verificação do comportamento dos sistemas sob presença ou não de variação no total produzido.

Ainda quanto aos dados da Tabela 6.7, notou-se que os menores tempos de fluxo foram obtidos pelo *kanban* e pelo TBC (médias consideradas iguais na comparação de Scheffé). Esse foi o mesmo comportamento obtido nos cenários com total de saídas variáveis,

como fica evidenciado na Figura 6.28. Nota-se que os tempos de fluxo dos sistemas CONWIP e *kanban* tiveram pequeno aumento (respectivamente 1,61% e 1,5%), do TBC permaneceu o mesmo e do empurrado reduziu consideravelmente (aproximadamente 9,39%). Essas pequenas alterações eram esperadas devido à aleatoriedade envolvida no modelo (existência de trabalhos totalmente manuais com tempos de processamento diferentes para grupos de eixos).

Tabela 6.6 – Resumo dos resultados obtidos para estoque intermediário e tempo de fila

Estação de trabalho	Tipo de sistema / medidas de desempenho	Cenário Atual (sistema empurrado)	CONWIP	Kanban	TBC	
ET1	Estoque intermediário (número de eixos)	Média	10,3	1,77	0,815	0,768
		Mínimo	1,5	0,978	0,354	0,334
		Máximo	22,2	2,51	1,26	1,1
	Tempo de fila (minutos)	Média	47,5	8,47	3,78	3,61
		Mínimo	8,01	4,91	1,77	1,77
		Máximo	98,4	11,6	5,62	5,5
ET2	Estoque intermediário (número de eixos)	Média	1,03	0,948	0,359	0,345
		Mínimo	0,261	0,29	0,132	0,132
		Máximo	1,87	2,07	0,583	0,658
	Tempo de fila (minutos)	Média	4,76	4,47	1,66	1,61
		Mínimo	1,44	1,63	0,667	0,667
		Máximo	9,22	9,96	2,56	2,89
ET3	Estoque intermediário (número de eixos)	Média	0,406	0,386	0,393	0,402
		Mínimo	0,166	0,191	0,208	0,234
		Máximo	0,639	0,67	0,642	0,822
	Tempo de fila (minutos)	Média	1,86	1,8	1,81	1,87
		Mínimo	0,913	1,04	1,07	1,3
		Máximo	2,78	2,94	3,06	3,7
ET4	Estoque intermediário (número de eixos)	Média	0,396	0,39	0,185	0,151
		Mínimo	0,243	0,206	0,0583	0,0589
		Máximo	0,633	0,639	0,238	0,28
	Tempo de fila (minutos)	Média	1,81	1,82	0,722	0,698
		Mínimo	1,17	1,16	0,274	0,274
		Máximo	2,99	2,85	1,35	1,26
ET5	Estoque intermediário (número de eixos)	Média	0,275	0,266	0,222	0,243
		Mínimo	0,0817	0,0709	0,0884	0,118
		Máximo	0,425	0,422	0,273	0,302
	Tempo de fila (minutos)	Média	1,26	1,24	0,12	0,148
		Mínimo	0,421	0,391	0,0132	0,0157
		Máximo	2	2,16	0,163	0,208

Tabela 6.7 – Tempo de fluxo obtidos para total de saídas fixo

SCO / Medida de desempenho	Cenário atual (sistema empurrado)	CONWIP	Kanban	TBC	
Total de saídas (número de eixos)	Média	91	91	91	
	Mínimo	91	91	91	
	Máximo	91	91	91	
	Desvio Padrão	0	0	0	
	Half-width	0	0	0	
Tempo de fluxo (minutos)	Média	69,5	37,9	27,1	26,5
	Mínimo	29,1	28,1	22,5	22,5
	Máximo	115	41,5	31,8	29
	Desvio Padrão	20,1	2,7	1,64	1,23
	Half-width	3,25	0,435	0,265	0,199

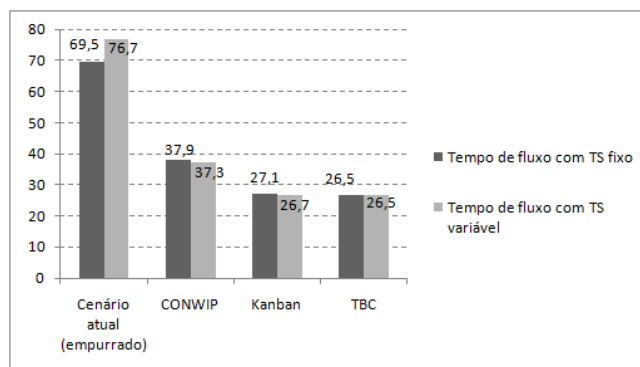


Figura 6.28 – Tempos de fluxo obtidos com total de saídas fixo e variável

A Tabela 6.8 mostra os resultados encontrados para utilização dos seis operadores presentes na linha de produção, considerando o cenário de total de saídas fixo. Identificou-se que as taxas se encontram mais uniformes para todos os sistemas testados, quando comparado com o cenário de total de saídas variável (vide Figura 6.29).

Tabela 6.8 – Utilização dos operadores para total de saídas fixo

Operador	Tipo de sistema	Cenário atual	CONWIP	Kanban	TBC
1	Média	57,1%	57,1%	57,1%	57,1%
	Mínimo	56,0%	55,9%	56,1%	55,9%
	Máximo	59,3%	59,4%	59,5%	59,4%
	Desvio Padrão	0,6650%	0,6140%	0,6110%	0,5930%
	Half-width	0,1070%	0,0990%	0,0986%	0,0957%
2	Média	54,9%	54,8%	54,9%	54,9%
	Mínimo	53,9%	53,9%	53,8%	53,8%
	Máximo	56,8%	56,7%	56,7%	56,8%
	Desvio Padrão	0,5160%	0,4820%	0,4910%	0,5010%
	Half-width	0,0833%	0,0778%	0,0793%	0,0808%
3	Média	56,4%	56,4%	56,3%	56,3%
	Mínimo	55,4%	55,3%	55,2%	55,2%
	Máximo	58,1%	58,2%	58,1%	58,1%
	Desvio Padrão	0,4930%	0,5180%	0,5150%	0,5150%
	Half-width	0,0795%	0,0835%	0,0831%	0,0831%
4	Média	56,9%	57,0%	57,0%	57,0%
	Mínimo	56,0%	56,0%	55,8%	55,8%
	Máximo	58,1%	58,1%	58,4%	58,4%
	Desvio Padrão	0,3860%	0,4100%	0,4240%	0,4400%
	Half-width	0,0623%	0,0661%	0,0683%	0,0711%
5	Média	54,9%	54,9%	55,0%	55,0%
	Mínimo	54,2%	54,2%	54,0%	54,0%
	Máximo	55,9%	55,7%	55,9%	55,8%
	Desvio Padrão	0,3310%	0,3200%	0,3630%	0,3590%
	Half-width	0,0534%	0,0516%	0,0586%	0,0579%
6	Média	50,5%	50,5%	50,5%	50,5%
	Mínimo	50,4%	50,4%	50,4%	50,4%
	Máximo	50,6%	50,6%	50,6%	50,6%
	Desvio Padrão	0,0411%	0,0375%	0,0375%	0,0375%
	Half-width	0,0066%	0,0061%	0,0061%	0,0061%

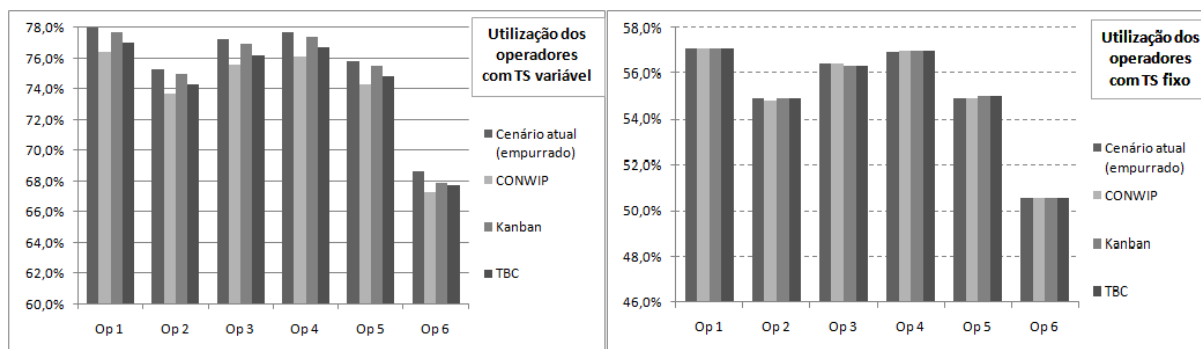


Figura 6.29 – Utilização dos operadores obtidos com total de saídas fixo e variável

Os estoques intermediários médios (EI) e os tempos médios de fila (TF), para o cenário com total fixo de saídas, são expostos na Tabela 6.9. Os menores EI e TF encontrados continuaram sendo propiciados pelo *kanban* e pelo TBC.

Tabela 6.9 – Estoque intermediário e tempo de fila obtidos com total de saídas fixo (continua...)

Estação de trabalho	Tipo de sistema / medidas de desempenho		Cenário Atual (sistema empurrado)	CONWIP	<i>Kanban</i>	TBC
ET1	Estoque intermediário (número de eixos)	Média	6,34	1,48	0,62	0,566
		Mínimo	0,939	0,858	0,245	0,245
		Máximo	12,6	2,01	1,11	0,874
		Desvio Padrão	2,95	0,236	0,174	0,131
		Half-width	0,476	0,0381	0,0281	0,0211
	Tempo de fila (minutos)	Média	41	9,57	3,96	3,61
		Mínimo	6	5,63	1,57	1,57
		Máximo	82,2	13,1	7,17	5,65
		Desvio Padrão	19,1	1,53	1,12	0,837
		Half-width	3,08	0,248	0,181	0,135
ET2	Estoque intermediário (número de eixos)	Média	0,667	0,652	0,212	0,211
		Mínimo	0,166	0,225	0,0708	0,0708
		Máximo	1,22	1,58	0,432	0,432
		Desvio Padrão	0,216	0,207	0,0485	0,0476
		Half-width	0,0348	0,0335	0,00783	0,00768
	Tempo de fila (minutos)	Média	4,25	4,16	1,34	1,33
		Mínimo	1,07	1,42	0,437	0,437
		Máximo	7,68	10,2	2,73	2,73
		Desvio Padrão	1,38	1,34	0,306	0,301
		Half-width	0,223	0,216	0,0494	0,0485
ET3	Estoque intermediário (número de eixos)	Média	0,209	0,213	0,268	0,263
		Mínimo	0,0719	0,0767	0,17	0,123
		Máximo	0,373	0,363	0,591	0,469
		Desvio Padrão	0,0499	0,0418	0,0705	0,0632
		Half-width	0,00805	0,00675	0,0114	0,0102
	Tempo de fila (minutos)	Média	1,32	1,34	1,67	1,64
		Mínimo	0,454	0,479	1,06	0,758
		Máximo	2,35	2,29	3,69	2,93
		Desvio Padrão	0,314	0,265	0,441	0,395
		Half-width	0,0507	0,0427	0,0711	0,0637

Tabela 6.9 – Estoque intermediário e tempo de fila obtidos com total de saídas fixo (...continuação)

Estação de trabalho	Tipo de sistema / medidas de desempenho	Cenário Atual (sistema empurrado)	CONWIP	Kanban	TBC	
ET4	Estoque intermediário (número de eixos)	Média	0,265	0,262	0,112	0,098
		Mínimo	0,158	0,15	0,101	0,036
		Máximo	0,525	0,44	0,13	0,199
		Desvio Padrão	0,0671	0,0627	0,0049	0,0505
		Half-width	0,0108	0,0101	0,0008	0,00815
	Tempo de fila (minutos)	Média	1,65	1,63	0,698	0,608
		Mínimo	0,976	0,937	0,687	0,225
		Máximo	3,28	2,75	0,716	1,23
		Desvio Padrão	0,418	0,391	0,0052	0,313
		Half-width	0,0675	0,063	0,001	0,0504
ET5	Estoque intermediário (número de eixos)	Média	0,198	0,19	0,034	0,0242
		Mínimo	0,0443	0,0589	0,0223	0,014
		Máximo	0,32	0,323	0,0484	0,0441
		Desvio Padrão	0,0704	0,0744	0,0042	0,00501
		Half-width	0,0114	0,012	0,0007	0,000808
	Tempo de fila (minutos)	Média	1,23	1,18	0,211	0,152
		Mínimo	0,273	0,364	0,21	0,14
		Máximo	1,98	2,02	0,212	0,166
		Desvio Padrão	0,436	0,462	0,00038	0,0044
		Half-width	0,0704	0,0745	0,00006	0,000711

A Figura 6.30 mostra o comportamento do posicionamento do EI ao longo da linha para os SCO considerando os cenários com total de saídas (TS) fixo e variável. Observa-se que, para ambos os cenários, os sistemas empurrado e CONWIP apresentaram o mesmo padrão de queda nos valores médios de EI ao longo da linha. Já, para os sistemas *kanban* e TBC a tendência também é de redução nos valores para ambos os cenários. Entretanto, no cenário com TS variável, na ET5 há um aumento do EI, comparado ao cenário com TS fixo. Para todos os sistemas, o maior acúmulo de EI é gerado no início da linha (ET1).

Quando se testou como seria o desempenho dos SCO puxados em um ambiente sem variação de tipos de produto (esse e outros testes são mais discutidos no capítulo 7), como realizado por Gaury, Pierreval e Kleijen (2000) e Paternina-Arboleda e Das (2001), o CONWIP manteve o comportamento de maior estoque na ET 1 e redução ao longo da linha (Figura 6.31). Já o comportamento da formação de estoques no *kanban* ficou mais estável em toda a linha. Para o TBC, houve inversão do comportamento, sendo que o maior estoque foi formado na ET5.

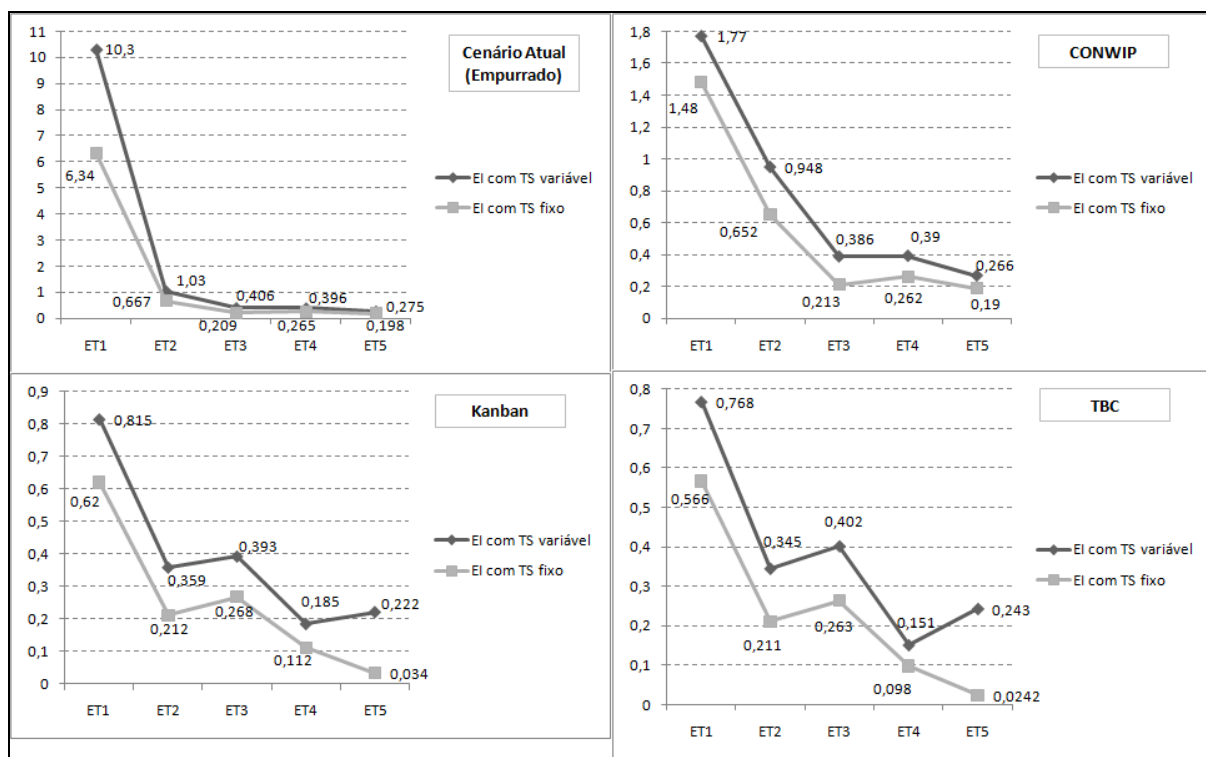


Figura 6.30 – Posicionamento ao longo da linha do estoque intermediário médio para os SCO com total de saídas fixo e variável

Ainda sobre a alocação dos estoques intermediários ao longo da linha, Gaury, Pierreval e Kleijen (2000) identificaram que os sistemas CONWIP, *kanban* e TBC apresentaram comportamentos iguais: equilibrado no meio, um pouco maior no início e alto no final, para linha com produção de tipo único de item. Como visto na Figura 6.31, esse comportamento foi seguido pelo TBC. Paternina-Arboleda e Das (2001), também com sistema produzindo tipo único de item, observaram que houve maior concentração de WIP na última estação de trabalho para todos os sistemas, sendo que o *kanban* obteve maior concentração também na terceira estação. Nessa pesquisa, o TBC também seguiu o padrão de maior concentração de estoque na última estação.

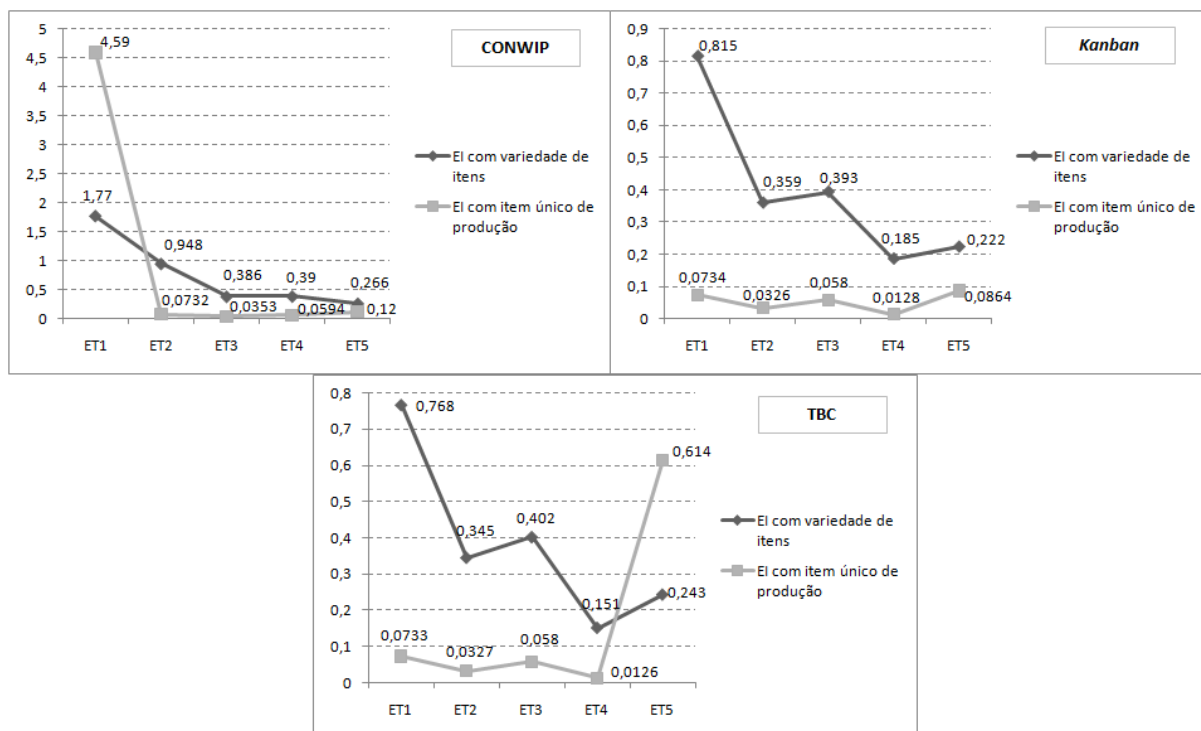


Figura 6.31 – Posicionamento do estoque intermediário médio ao longo da linha para os cenários com e sem variedade de itens a serem produzidos

6.6 Considerações finais

Nesse capítulo, houve a modelagem e simulação dos sistemas de coordenação de ordens CONWIP, *kanban* e TBC, considerando os dados do cenário atual da linha de eixos traseiros na empresa estudada. Logo, o objetivo pretendido nessa fase foi alcançado. Cabe salientar que os resultados apresentados no Capítulo 6 foram discutidos conforme as principais análises para modelos de simulação explicitadas por Prado (2004) e apoiadas por Kelton, Sadowski e Sadowski (2007).

Em uma análise global, o TBC e o *kanban* mostraram-se melhores que o CONWIP e o sistema empurrado (situação atual da empresa). Para testar ainda mais esse fato observado, devido à pequena diferença no total de saídas encontrado (123 para o sistema empurrado contra 119 nos sistemas puxados), proporcionou-se a equalização do total produzido, ou seja, em todos os modelos houve o mesmo total de saídas ou o mesmo *throughput* (itens/dia). Ainda assim, a ordem dos melhores sistemas continuou a mesma, indicando que o padrão de comportamento destes permaneceu o mesmo de uma forma geral.

Portanto, baseado em um caso prático, essa parte da pesquisa realizada apontou a superioridade dos sistemas puxados estudados em relação ao sistema empurrado tradicional

em ambiente *flow shop*, que ainda é utilizado em grande parte das empresas. Esses resultados condizem com modernos paradigmas de gestão da manufatura, como a manufatura enxuta, que advogam o uso de sistemas puxados para o planejamento e controle da produção.

De um modo geral, o fato dos sistemas puxados terem melhor desempenho do que o sistema empurrado era esperado devido a fundamentos da literatura existente na área de engenharia de produção. Esse aspecto também foi confirmado em estudos de simulação de SCO, como em Spearman, Woodruff e Hopp (1990), Bonvik, Couch e Gershwin (1997), Huang, Wang e Ip (1998a,b), Yang (2000), Marek, Elkins e Smith (2001), Paternina-Arboleda e Das (2001), Takahashi e Nakamura (2002), dentre outros, nos quais em algum momento das pesquisas os sistemas CONWIP, *kanban* e/ou TBC se mostraram com desempenho superior. Esse fato também foi evidenciado nas simulações aqui realizadas e seria interessante a ser considerado pela empresa estudada para alteração do SCO utilizado.

Embora atualmente exista certa disposição para a implantação de sistemas puxados nas empresas, em grande parte das vezes, os gestores de produção possuem dificuldades durante a seleção de qual sistema puxado usar. No próximo capítulo os sistemas CONWIP, *kanban* e TBC são explorados em diversos cenários e em literatura que já efetuou comparações desses sistemas, de modo a orientar as empresas sobre possíveis formas de análise que podem ser realizadas para apoiar o processo decisório de escolha do melhor sistema puxado a ser utilizado.

Quanto ao processo de otimização do número de cartões, cabe salientar que, conforme Silva (2009), a lentidão é uma característica verificada nos softwares comerciais de simulação que possuam rotinas de otimização integradas, pois a velocidade das heurísticas depende da determinação dos parâmetros: valores sugeridos (solução viável inicial), limites inferiores e limites superiores das variáveis de decisão.

A principal contribuição do presente capítulo é a obtenção de resultados que subsidiarão a discussão a ser realizada no capítulo 7, quanto às principais conclusões obtidas para os sistemas analisados. Ainda, destaca-se que se pode usar a simulação computacional como ferramenta de auxílio ao ensino e aprendizagem. Para a empresa, além de utilizar os modelos para visualizar os possíveis impactos gerados na linha com uso de dado SCO, pode também utilizar os modelos como ferramenta de apoio visual ao treinamento de novos funcionários que viriam a lidar diariamente com o SCO selecionado e implantado. Quanto ao meio acadêmico, os modelos aqui elaborados poderiam ser utilizados como recurso didático em aulas de planejamento e controle da produção e de simulação de sistemas.

CAPÍTULO 7 – ANÁLISE DOS SISTEMAS CONWIP, KANBAN E TBC SIMULADOS EM DIFERENTES CENÁRIOS

7.1 Considerações Iniciais

No Capítulo 6, os dados inseridos nos modelos dos SCO permaneceram sob as condições originais dos dados cedidos pela empresa, conforme discutido no capítulo 5. Dentre essas condições estão: a demanda e a taxa de chegada dos eixos no sistema seguem a distribuição de Poisson com média 3,123 minutos, os tempos de processamento seguem a distribuição Triangular, sendo que os valores dos parâmetros dessa distribuição são diferentes para cada grupo de eixos, devido a existência de instruções de processo para cada grupo que demanda tempos diferentes de processamento. Lembra-se que o sistema real é preparado para lidar com 10 modelos de eixo, no entanto, a ordem de produção utilizada contém sete modelos a serem produzidos. Assim, em todos os eventos importantes modelados há a representação, por meio de distribuições de probabilidade, da aleatoriedade presente no sistema real.

Nesse capítulo o objetivo é analisar o desempenho dos sistemas puxados CONWIP, *kanban* e TBC sob diferentes cenários. Portanto, o foco da análise é no desempenho dos sistemas perante as medidas *throughput* e WIP, e não no melhor resultado para aplicação na empresa. Essa postura se deve pelo intuito de testar situações diferentes as que ocorrem na empresa para identificar condições favoráveis ou desfavoráveis para uso destes. Com isso, é possível propor um mapa mental (*mind map*) com características que auxiliem na escolha de SCO estudados na tese.

O mapa mental (*mind map*) consiste em diagrama usado para delinear visualmente informações, criado por Tony Buzan em 1970 (THINKBUZAN, 2012). Aqui, o uso dessa ferramenta foi proposto com a finalidade de melhor organizar os principais resultados de cenários testados, para assim facilitar a visualização durante o processo de tomada de decisão para os gestores e pesquisadores que seguirem o molde dessa tese.

Os cenários avaliados foram: i) demanda sob diversos coeficientes de variação; ii) chegada dos eixos sob diversos coeficientes de variação; iii) tempos de processamento sob diversos coeficientes de variação; iv) gargalos na linha de produção; v) alteração na variedade de produtos. Esses esforços realizados se assemelham as análises de cenários “*what-if*” presentes em sistemas de apoio à decisão (SAD), discutidos por autores como Stair e Reynolds (2006) e Laudon e Laudon (2007), onde é possível variar certos valores para testar

resultados. Destaca-se que essas análises envolvem técnicas/modelagens analíticas, sendo que no presente estudo há o uso da simulação, que faz parte de métodos de computação numérica, conforme Gordon (1978).

Cabe destacar que os modelos foram desenvolvidos com os dados da empresa automobilística, conforme apresentado nos capítulos 5 e 6, e somente houve alteração nos dados que caracterizam os cenários especificados. Também, à medida que os resultados foram apresentados, estes foram confrontados com resultados de pesquisas com análises similares.

Para a determinação dos coeficientes de variação, considerou-se a seguinte fórmula também utilizada no capítulo 5 (FREITAS FILHO, 2008, p. 239):

$$\text{Coeficiente de Variação} = \frac{\text{Desvio Padrão}}{\text{Média Amostral}} \quad (7.1)$$

Também, tomaram-se como base propriedades das distribuições de probabilidade utilizadas, sendo a Poisson para taxa de chegada e demanda realizada e a Normal para os tempos de processamento. As propriedades são:

- Na distribuição Normal, a média é dada por μ e a variância é dada por σ^2 (SPIEGEL, 1993). A raiz quadrada positiva da variância, σ , é chamada de desvio-padrão de X (variável aleatória com distribuição de probabilidade $f(X)$ e média μ) (WALPOLE et al., 2009, p. 75).
- “Tanto a média quanto a variância da distribuição de Poisson $p(x; \lambda_t)$ são λ_t ” (WALPOLE et al., 2009, p. 105). Assim, para média $\mu = \lambda$, para variância $\sigma^2 = \lambda$ e para desvio padrão $\sigma = \sqrt{\lambda}$ (SPIEGEL, 1993, p. 189).

Para a modelagem e simulação dos cenários testados, foram considerados os dados coletados para a elaboração dos modelos apresentados nos capítulos 5 e 6. Para os cenários que testam os sistemas com demanda e chegada dos eixos sob diversos coeficientes de variação, houve a manutenção da distribuição de Poisson, pois, conforme Chwif e Medina (2007) e Kelton, Sadowski e Sturrock (2007), melhor representa o número de eventos que ocorrem em um intervalo de tempo fixo, ex. ritmos de chegada, que são exatamente os dados disponibilizados pela empresa. Ainda, é utilizada em estudos afins ao tema dessa tese, como em Frein, Di Mascolo e Dallery (1995) e Bonvik, Couch e Gershwin (1997). Já, no cenário com tempos de processamento sob diversos coeficientes de variação, utilizou-se a distribuição Normal para propiciar tal análise, como realizado em Sarker e Fitzsimmons (1989). Ainda, segundo Chwif e Medina (2007, p. 215) essa distribuição modela [...] “situações em que a

distribuição do processo envolvido pode ser considerada como a soma de um conjunto de processos componentes”[...], como o tempo de execução de uma operação (KELTON; SADOWSKI; STURROCK, 2007).

Salienta-se que utilizar distribuições que representem da melhor maneira possível o comportamento estocástico de dada variável é uma grande preocupação na área de simulação, advogada por autores como Law e Kelton (2000), Chwif e Medina (2007), Kelton, Sadowski e Sturrock (2007), Freitas Filho (2008), dentre outros. Ressalta-se, novamente, que uma das armadilhas em estudos de simulação é o uso arbitrário de distribuições de probabilidade como dados de entrada (LAW; KELTON, 2000).

Para atingir o objetivo almejado, o capítulo foi estruturado da seguinte forma: i) na seção 7.2 há a análise do cenário de demanda sob diversos coeficientes de variação; ii) na seção 7.3 está a análise do cenário de chegada dos eixos sob diversos coeficientes de variação; iii) na seção 7.4 é exposta a análise do cenário com tempo de processamento sob diversos coeficientes de variação; iv) a seção 7.5 possui a análise do cenário com gargalos na linha de produção; v) a seção 7.6 possui a análise do cenário com alteração na variedade de produtos; vi) a seção 7.7 traz as considerações finais.

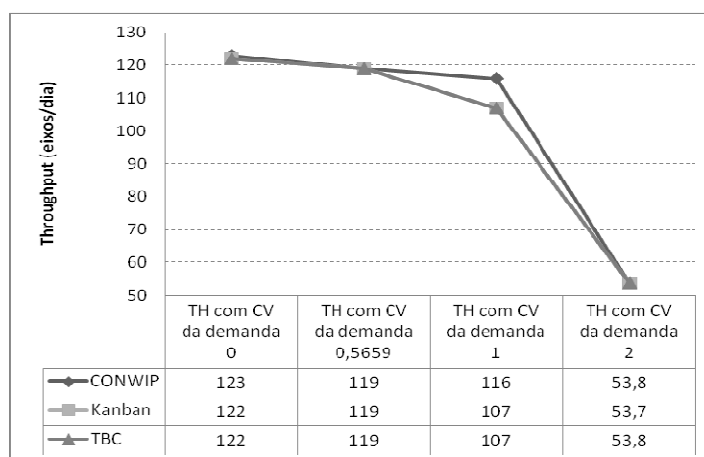
7.2 Análise do cenário de demanda sob diversos coeficientes de variação

O principal propósito desse experimento é verificar como o *throughput* e o WIP da linha se comportariam frente a modificações no coeficiente de variação da demanda. Os coeficientes de variação (CV) testados foram: i) 0 – indica que a formação da demanda se encontra constante; ii) 0,5659 – esse valor é o coeficiente de variação atual do modelo desenvolvido na empresa automobilística, e indica que, em média, os desvios relativamente à média atingem 56,59% do valor desta; iii) 1 - os desvios relativamente à média atingem 100% do valor desta; iv) 2 - os desvios relativamente à média atingem 200% do valor desta. Portanto, quanto menor o CV, maior precisão dos dados. No contexto desta pesquisa, quanto menor o CV, mais estável é o processo de formação da demanda e quanto maior o CV, o ambiente é mais turbulento quanto à formação da demanda.

Como pode ser observado na Tabela 7.1 e na Figura 7.1, os sistemas obtiveram *throughput* médio nivelado para os CV ‘0’, ‘0,5659’ e ‘2’. No entanto, com CV ‘1’, o CONWIP apresenta melhor desempenho comparado ao *kanban* e ao TBC. Cabe, também, observar a tendência de redução do *throughput* dos sistemas à medida que o CV aumenta.

Tabela 7.1 – *Throughput* sob diferentes coeficientes de variação da demanda

Coeficiente de variação da demanda	<i>Throughput</i> (eixos/dia)	CONWIP	Kanban	TBC
0	Média	123	122	122
	Mínimo	101	96	96
	Máximo	130	130	130
	Desvio padrão	6,96	7,4	7,56
	<i>Half-width</i>	1,12	1,19	1,22
0,5659	Média	119	119	119
	Mínimo	101	103	102
	Máximo	130	130	130
	Desvio padrão	7,66	7,18	7,42
	<i>Half-width</i>	1,24	1,16	1,2
1	Média	116	107	107
	Mínimo	95	95	90
	Máximo	128	119	121
	Desvio padrão	5,12	4,39	4,85
	<i>Half-width</i>	0,827	0,708	0,783
2	Média	53,8	53,7	53,8
	Mínimo	48	48	47
	Máximo	58	59	59
	Desvio padrão	2,17	2,35	2,24
	<i>Half-width</i>	0,35	0,379	0,361

Figura 7.1 – Gráfico do *throughput* sob diferentes coeficientes de variação da demanda

Quanto ao WIP formado na linha, o TBC em uma análise geral, obteve os menores valores (vide Tabela 7.2 e Figura 7.2). No entanto, o *kanban*, a partir do CV 1 passou a ter um comportamento de aumento de WIP na linha, sendo que, com CV 2, o sistema obteve grande aumento no WIP comparado aos demais SCO. Isso se deve pelo sistema não lidar bem com ambientes menos estáveis na formação da demanda, quando comparados aos outros SCO. Já o CONWIP, a partir de CV 1 demonstrou possível tendência de queda nos valores de WIP.

Tabela 7.2 – WIP sob diferentes coeficientes de variação da demanda

Coeficiente de variação da demanda	WIP (eixos)	CONWIP	Kanban	TBC
0	Média	3,88	1,69	1,7
	Mínimo	2,16	0,585	0,585
	Máximo	4,39	2,52	2,32
	Desvio padrão	0,454	0,308	0,305
	Half-width	0,0733	0,0496	0,0492
0,5659	Média	3,76	1,75	1,67
	Mínimo	2,04	0,955	0,942
	Máximo	4,34	2,79	2,31
	Desvio padrão	0,498	0,31	0,255
	Half-width	0,0803	0,0499	0,0412
1	Média	3,17	3,13	0,936
	Mínimo	1,54	0,967	0,494
	Máximo	4,15	10,3	1,74
	Desvio padrão	0,431	1,68	0,222
	Half-width	0,0696	0,271	0,0358
2	Média	0,609	21,5	0,133
	Mínimo	0,315	16,2	0,0561
	Máximo	0,931	23,4	0,257
	Desvio padrão	0,121	1,25	0,0314
	Half-width	0,0195	0,201	0,00507

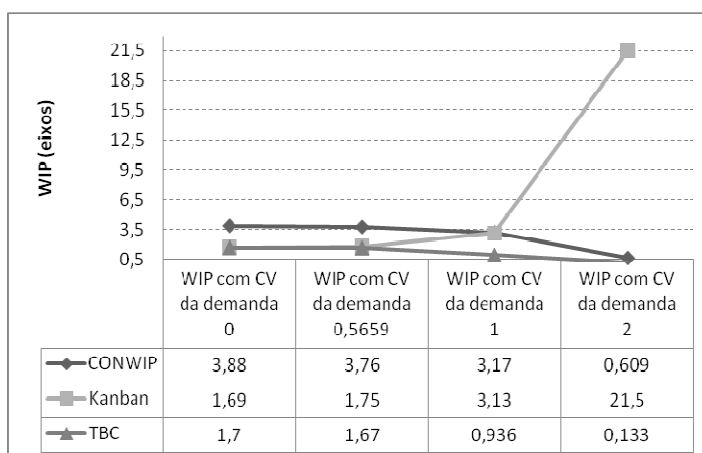


Figura 7.2 – Gráfico do WIP sob diferentes coeficientes de variação da demanda

Quando os valores de *throughput* e WIP obtidos para cada SCO foram analisados por meio da ANOVA e pelo método de Scheffé, verificou-se que (vide Apêndice A):

- Para todos os CV, os valores médios de *throughput* foram considerados iguais (H_0 corroborada);
- Para CV 0 e CV 0,5659, os WIP médios do *kanban* e do TBC, que foram os sistemas com melhores desempenhos, foram considerados iguais. Para CV 1 e CV 2, o TBC foi considerado o melhor sistema quanto a WIP médio, pois a média dele foi considerada diferente a do sistema com segundo melhor desempenho.

Os resultados obtidos nessa seção complementam o estudo de Bonvik, Couch e Gershwin (1997), os quais encontraram que o sistema TBC haveria melhor nível de estoque no sistema do que o CONWIP e o *kanban*, considerando o cenário com CV 0 na formação da demanda e com produção de apenas um tipo de item. Ainda, o *kanban* que proporcionou o maior nível de estoque.

Paternina-Arboleda e Das (2001) também analisaram esses sistemas sob condição de demanda com CV 0 para a produção de tipo único de item, com nível de serviço de até 99,9%. Verificaram que o TBC atingiu menor WIP médio, seguido do CONWIP e do *kanban*. Nessa tese, verificou-se no cenário de CV 0 e com produção de pequena variedade de modelos de eixos traseiros (sete modelos), que o *kanban* obteve menor WIP médio, seguido do TBC e do CONWIP. Com os outros valores de CV o TBC liderou o melhor desempenho.

Como conclusão geral para os cenários analisados nessa seção, verificou-se:

- Para determinado valor aproximado de *throughput*, o TBC foi o sistema que se comportou melhor frente a aumentos do coeficiente de variação da demanda. O CONWIP foi o segundo melhor sistema e o *kanban* se mostrou o pior sistema.

7.3 Análise do cenário de chegada dos eixos sob diversos coeficientes de variação

O intuito desse experimento é identificar o desempenho dos sistemas puxados frente a alterações nos coeficientes de variação da chegada dos eixos na linha de produção. Os coeficientes de variação (CV) testados foram: i) 0 – indica que os eixos chegam ao início da linha de forma constante; ii) 0,5659 – os desvios relativamente à média da taxa de chegada atingem 56,59% do valor desta (esse valor também é o praticado no modelo da empresa automobilística); iii) 1 - os desvios relativamente à média atingem 100% do valor desta; iv) 2 - os desvios relativamente à média da taxa de chegada atingem 200% do valor desta.

Como pode ser notado na Tabela 7.3 e na Figura 7.3, independentemente do CV adotado na chegada dos eixos no início da linha, os sistemas CONWIP, *kanban* e TBC possuíram o *throughput* médio nivelado. Ainda, como esperado, à medida que o CV aumentou o *throughput* reduziu.

Nesse cenário, o TBC apresentou o menor WIP médio para CV 0, sendo que para os demais CV o *kanban* e o TBC obtiveram menores WIP médio. O CONWIP obteve os maiores valores de WIP para todos os coeficientes de variação testados (Tabela 7.4 e Figura 7.4).

Tabela 7.3 – *Throughput* sob diferentes coeficientes de variação da chegada

Coefficiente de variação da taxa de chegada	<i>Throughput</i> (eixos/dia)	CONWIP	Kanban	TBC
0	Média	124	123	123
	Mínimo	101	100	99
	Máximo	130	130	130
	Desvio padrão	7,34	7,1	7,47
0,5659	Média	119	119	119
	Mínimo	101	103	102
	Máximo	130	130	130
	Desvio padrão	7,66	7,18	7,42
1	Média	103	103	103
	Mínimo	94	94	94
	Máximo	116	112	112
	Desvio padrão	3,85	3,84	3,79
2	Média	52,6	52,6	52,6
	Mínimo	47	47	47
	Máximo	59	59	59
	Desvio padrão	2,26	2,3	2,32
	<i>Half-width</i>	0,364	0,372	0,374

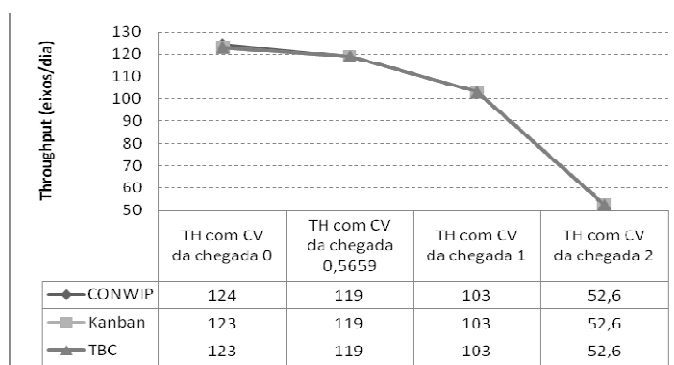
Figura 7.3 – Gráfico do *throughput* sob diferentes coeficientes de variação da chegada

Tabela 7.4 – WIP sob diferentes coeficientes de variação da chegada

Coefficiente de variação da taxa de chegada	WIP (eixos)	CONWIP	Kanban	TBC
0	Média	4,16	1,91	1,8
	Mínimo	2,52	1,51	1,4
	Máximo	4,36	3,04	2,32
	Desvio padrão	0,179	0,223	0,192
0,5659	Média	3,76	1,75	1,67
	Mínimo	2,04	0,955	0,942
	Máximo	4,34	2,79	2,31
	Desvio padrão	0,498	0,31	0,255
1	Média	1,76	0,526	0,528
	Mínimo	1,14	0,197	0,197
	Máximo	2,64	0,943	0,975
	Desvio padrão	0,31	0,173	0,175
2	Média	0,401	0,0256	0,0259
	Mínimo	0,236	0,00385	0,00455
	Máximo	0,698	0,116	0,116
	Desvio padrão	0,0983	0,0147	0,0146
	<i>Half-width</i>	0,0159	0,00236	0,00236

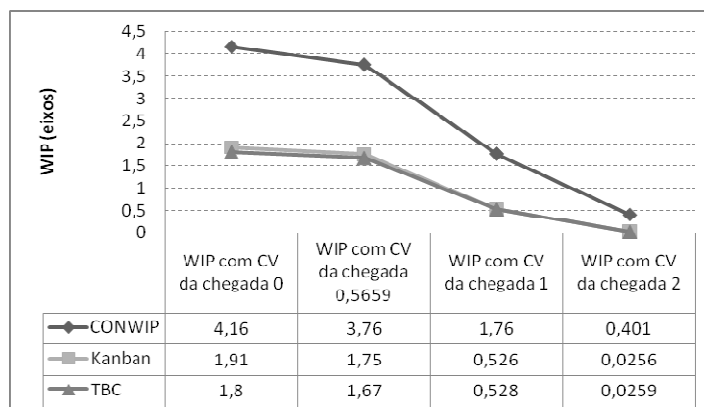


Figura 7.4 – Gráfico do WIP sob diferentes coeficientes de variação da chegada

Ao analisar por meio da ANOVA e pelo método de Scheffé os valores de *throughput* e WIP encontrados para os SCO estudados, notou-se que (vide Apêndice A):

- Os valores médios de *throughput* foram considerados iguais (H_0 corroborada) para todos os CV;
- Para CV 0 o WIP médio do TBC foi considerado diferente do segundo melhor sistema. Para os demais CV, os WIP médios do *kanban* e do TBC foram considerados iguais.

Marek, Elkins e Ip (2001) utilizaram CV 0 para taxa de chegada em seus experimentos ao compararem o *kanban* com o CONWIP. Notaram que o *kanban* teve um controle mais estreito do WIP do sistema. Essa situação também foi verificada na presente pesquisa, o qual *kanban* teve menor WIP do que o CONWIP, devido ao uso de cartões que controlam os estoques intermediários entre as estações de trabalho.

A seguir está a conclusão geral para os cenários analisados nessa seção:

- O desempenho do *kanban* e do TBC continuou melhor, quanto à medida WIP, frente a aumentos nos coeficientes de variação da chegada. O CONWIP não obteve bons desempenhos para WIP em nenhum CV testado.

7.4 Análise do cenário com tempos de processamento sob diversos coeficientes de variação

O objetivo do presente experimento é verificar como os SCO puxados se desempenham mediante modificações nos coeficientes de variação dos tempos de processamento. Os CV utilizados são: i) 0 – indica que os tempos de processamento são constantes; ii) 0,5659 – os desvios relativamente à média dos tempos de processamento

atingem 56,59% do valor desta; iii) 1 - os desvios relativamente à média dos tempos de processamento atingem 100% do valor desta; iv) 2 - os desvios relativamente à média atingem 200% do valor desta.

Quando foram testados diferentes coeficientes de variação para os tempos de processamento, foi observado que o CONWIP obteve o melhor desempenho para *throughput*, comparado aos demais sistemas, à medida que o CV aumenta. Já o *kanban* obteve os piores *throughput* com o aumento do CV (vide Tabela 7.5 e Figura 7.5).

Tabela 7.5 – *Throughput* sob diferentes coeficientes de variação do tempo de processamento

Coeficiente de variação do processamento	<i>Throughput</i> (eixos/dia)	CONWIP	Kanban	TBC
0	Média	119	119	119
	Mínimo	96	96	96
	Máximo	130	130	130
	Desvio padrão	7,41	7,4	7,4
	<i>Half-width</i>	1,2	1,19	1,19
0,5659	Média	100	99,4	99,8
	Mínimo	92	90	90
	Máximo	110	109	107
	Desvio padrão	3,2	3,14	3,09
	<i>Half-width</i>	0,517	0,507	0,499
1	Média	82,5	80,8	82,1
	Mínimo	73	71	71
	Máximo	93	92	93
	Desvio padrão	3,9	4,08	3,96
	<i>Half-width</i>	0,629	0,658	0,64
2	Média	55,5	54,2	55,3
	Mínimo	45	45	45
	Máximo	66	64	66
	Desvio padrão	3,62	3,74	4,25
	<i>Half-width</i>	0,583	0,604	0,685

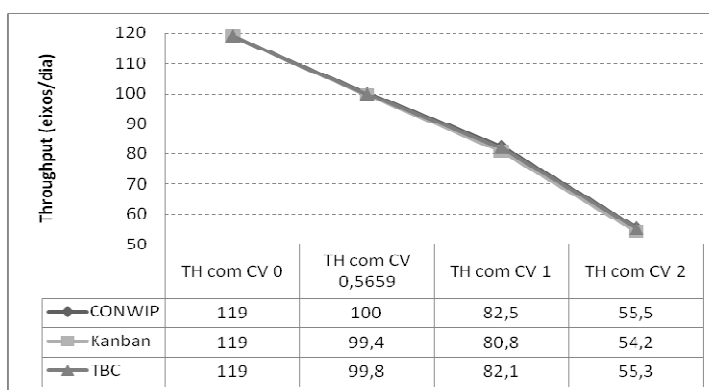


Figura 7.5 – Gráfico do *throughput* sob diferentes coeficientes de variação do tempo de processamento

Ao verificar o WIP médio formado, como pode ser visto na Tabela 7.6 e na Figura 7.6, observou-se que o *kanban*, a partir do CV 0,5659 passou a ter os menores valores

e o TBC, que havia dado o melhor valor com CV 0, passou a aumentar o WIP na linha. O CONWIP em todos os CV apresentou os maiores valores de WIP.

Tabela 7.6 – WIP sob diferentes coeficientes de variação do tempo de processamento

Coefficiente de variação do processamento	WIP (eixos)	CONWIP	Kanban	TBC
0	Média	3,7	1,52	1,49
	Mínimo	1,76	0,618	0,618
	Máximo	4,31	2,56	1,89
	Desvio padrão	0,486	0,24	0,207
	Half-width	0,0784	0,0387	0,0335
0,5659	Média	5,02	3,01	3,15
	Mínimo	4,27	2,19	2,05
	Máximo	5,42	4,61	4,54
	Desvio padrão	0,196	0,39	0,466
	Half-width	0,0317	0,0629	0,0752
1	Média	5,39	3,17	3,42
	Mínimo	4,83	1,97	2,13
	Máximo	5,87	4,95	5,76
	Desvio padrão	0,178	0,439	0,627
	Half-width	0,0286	0,0708	0,101
2	Média	5,7	3,26	3,68
	Mínimo	5,21	2,02	2,23
	Máximo	6,19	5,85	6,02
	Desvio padrão	0,186	0,548	0,887
	Half-width	0,0301	0,0884	0,143

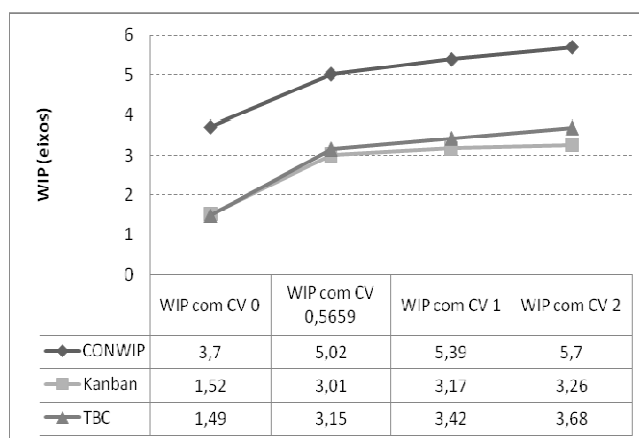


Figura 7.6 – Gráfico do WIP sob diferentes coeficientes de variação do tempo de processamento

Quando os valores de *throughput* e WIP obtidos para cada SCO foram analisados por meio da ANOVA e pelo método de Scheffé, observou-se que (vide Apêndice A):

- Para o CV0, os valores médios de *throughput* foram considerados iguais. Para os demais CV, os valores de *throughput* médio do CONWIP e do TBC, sistemas com melhores desempenhos, foram considerados iguais;

- Para CV 0, os WIP médios do *kanban* e do TBC, que foram os sistemas com melhores desempenhos, foram considerados iguais. Para os demais CV, o *kanban* foi o melhor sistema quanto a WIP médio, pois a média deste foi considerada diferente a do sistema com segundo melhor desempenho.

Sarker e Fitzsimmons (1989), em uma pesquisa que comparou o desempenho de sistemas puxado (*kanban*) e empurrado em um caso hipotético com tipo único de item a ser produzido, mostraram que em um sistema puxado as saídas decresceram e o WIP total aumenta à medida que o coeficiente de variação dos tempos de processamento dos estágios aumenta. Entretanto, o sistema puxado sempre apresentou menores valores de WIP. Nessa tese, verificou-se esse mesmo comportamento para todos os sistemas puxados analisados. No entanto, o *kanban* propiciou menores valores de WIP a partir de CV '0,5659', comparado ao CONWIP e ao TBC.

Para os cenários testados na presente seção, chegou-se a seguinte conclusão geral:

- Para maiores coeficientes de variação do tempo de processamento, o *kanban* se comportou melhor quanto à formação de WIP, seguido do TBC. O CONWIP apresentou o pior desempenho para essa medida.

7.5 Análise do cenário com gargalos na linha de produção

O intuito dessa análise é verificar o desempenho do CONWIP, *kanban* e TBC com presença de gargalos na linha de montagem. Para elaborar esse cenário, considerou-se o conceito de recurso gargalo advogado por Lage Junior e Bonato (2010) e Goldratt e Fox (1997). Segundo esses autores, recurso(s) gargalo(s) representa(m) o(s) recuso(s) que restringe(m) a saída (*output*) do sistema de produção, com capacidade de operação menor do que a demandada.

Para tanto, no presente modelo houve a aproximação da taxa de utilização dos recursos, que foram representados como gargalos, em torno de 85%, que representaria a utilização máxima permitida do operador frente às legislações vigentes. Para isso, houve a necessidade do aumento do tempo de operação destes para pelo menos o dobro do tempo representado no modelo atual da empresa, utilizado no capítulo 5.

A fim de mostrar o impacto da ausência e da presença de gargalo(s) na linha, nas Tabelas 7.7 e 7.8 e nas Figuras 7.7 e 7.8, foram evidenciados os desempenhos dos SCO

para zero, um, dois e três gargalos na linha. As estações de trabalho (ET) modeladas como gargalos foram: i) modelo com um gargalo: ET2; ii) modelo com dois gargalos: ET2 e ET4; iii) modelo com três gargalos: ET2, ET4 e ET5. A perspectiva com vários gargalos (*multi-bottleneck*) foi utilizada por Gilland (2002) ao analisar os sistemas CONWIP, DBR e políticas *clockwork* e PFB (*pull from bottleneck*).

Na Tabela 7.7 e na Figura 7.8 pode-se observar que os *throughputs* ficaram praticamente equalizados para o CONWIP, *kanban* e TBC independente da ausência ou presença de gargalos na linha. No entanto, na presença de três gargalos, o CONWIP e o *kanban* apresentaram melhores valores médios de *throughput*.

Apesar do *throughput* praticamente igualado para todos os sistemas independente da presença de gargalo, notou-se também que o CONWIP apresentou o menor WIP quando há presença de três gargalos na linha. O TBC e o *kanban* apresentaram os melhores desempenhos na ausência de gargalo e na presença de um e dois gargalos na linha (vide Tabela 7.8 e Figura 7.8).

Tabela 7.7 – *Throughput* sob ausência e presença de gargalo(s)

Quantidade de gargalos	<i>Throughput</i> (eixos/dia)	CONWIP	Kanban	TBC
0	Média	119	119	119
	Mínimo	101	103	102
	Máximo	130	130	130
	Desvio padrão	7,66	7,18	7,42
	<i>Half-width</i>	1,24	1,16	1,2
1	Média	69,1	69,1	69
	Mínimo	67	67	67
	Máximo	71	70	71
	Desvio padrão	0,483	0,349	0,477
	<i>Half-width</i>	0,0779	0,0564	0,0769
2	Média	62,3	62,3	62,2
	Mínimo	60	60	60
	Máximo	64	64	64
	Desvio padrão	0,632	0,615	0,652
	<i>Half-width</i>	0,102	0,0992	0,105
3	Média	59,8	59,8	58,9
	Mínimo	58	58	57
	Máximo	60	60	60
	Desvio padrão	0,459	0,447	0,371
	<i>Half-width</i>	0,074	0,0721	0,0598

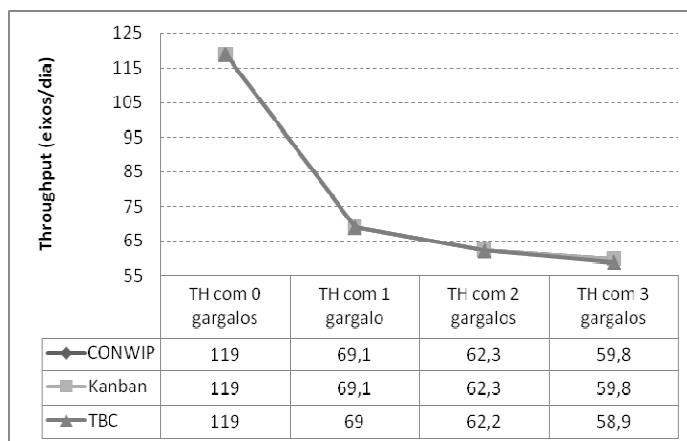


Figura 7.7 – Gráfico do *throughput* sob ausência e presença de gargalo(s)

Tabela 7.8 – WIP sob ausência e presença de gargalo(s)

Quantidade de gargalos	WIP (eixos)	CONWIP	Kanban	TBC
0	Média	3,76	1,75	1,67
	Mínimo	2,04	0,955	0,942
	Máximo	4,34	2,79	2,31
	Desvio padrão	0,498	0,31	0,255
	Half-width	0,0803	0,0499	0,0412
1	Média	5,96	2,44	2,43
	Mínimo	5,54	2,26	2,31
	Máximo	6,11	2,48	2,48
	Desvio padrão	0,104	0,0346	0,0366
	Half-width	0,0169	0,00559	0,0059
2	Média	5,56	4,78	4,8
	Mínimo	5,24	4,08	4,06
	Máximo	5,76	5,69	5,59
	Desvio padrão	0,089	0,316	0,308
	Half-width	0,0144	0,0509	0,0497
3	Média	5,08	6,42	6,14
	Mínimo	4,87	5,77	5,56
	Máximo	5,23	7,11	6,7
	Desvio padrão	0,0559	0,233	0,202
	Half-width	0,00903	0,0377	0,0327

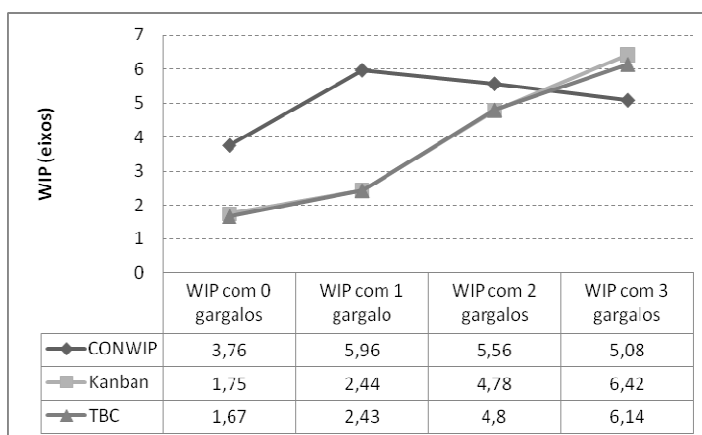


Figura 7.8 – WIP sob ausência e presença de gargalo(s)

Ao analisar por meio da ANOVA e pelo método de Scheffé os valores de *throughput* e WIP de cada SCO, foram identificados os seguintes pontos (vide Apêndice A):

- Na condição de inexistência de gargalo, e presença de um e dois gargalos, os valores médios de *throughput* foram considerados iguais para todos os SCO analisados. Na presença de três gargalos, os *throughputs* dos sistemas CONWIP e *kanban*, que apresentaram os melhores desempenhos, foram considerados iguais;
- Quando não há gargalo, e na presença de um e dois gargalos, os valores médios de WIP foram considerados iguais para o *kanban* e para o TBC (SCO com melhores desempenhos). Quando há três gargalos, o CONWIP obteve o melhor valor (média considerada diferente do segundo melhor sistema).

A seguir estão alguns resultados de trabalhos que estudaram *flow shops* com presença de gargalo na linha de produção, em estudos hipotéticos e reais, sem e com pequena variedade de mix.

Gilland (2000), em seu estudo com produção de tipo único de item, mostrou que o CONWIP não obteve os melhores valores de WIP e *throughput*, no entanto, confirmou uma vantagem esperada do CONWIP: este SCO garante que o gargalo do sistema fique dentro dos seus domínios de controle. Na presente tese, verificou-se que o CONWIP alcançou os melhores *throughputs*, juntamente com o *kanban* e com o TBC, no entanto, somente teve o melhor WIP quando a linha passou a ter três gargalos.

Huang, Wang e Ip (1998a) em um caso real com 10 estações de trabalho e dois tipos de itens a serem produzidos, averiguaram que o CONWIP mostrou melhor desempenho em todas as medidas analisadas, dentre elas WIP total e *throughput*, em todos os cenários (com possibilidades ou não de estoque de produtos acabados e tamanho de estoque intermediário). Já em Huang, Wang e Ip (1998b), considerando a mesma entrada e o mesmo *throughput*, o CONWIP, comparado ao *kanban*, apresentou menor WIP. Esses resultados somente foram confirmados nessa tese na presença de três gargalos na linha.

Marek, Elkins e Smith (2001), para um estudo hipotético com presença de gargalo na linha e produção de um tipo de item, verificaram que o CONWIP apresentou maior *throughput* com menor WIP do que o *kanban*. Na presente pesquisa, foi observado que os *throughputs* do CONWIP e do *kanban* foram iguais, independente do número de gargalos na linha e que o *kanban* apresentou menores valores de WIP do que o CONWIP até o cenário com dois gargalos na linha.

Wang, Cao e Kong (2009), em uma pesquisa hipotética com presença de gargalo e tipo único de item, identificaram que os sistemas CONWIP e TBC não obtiveram o melhor desempenho, no entanto, o TBC foi o segundo melhor sistema para todas as medidas consideradas, dentre elas WIP e *throughput*. Nessa tese, observou-se que o TBC não obteve melhor *throughput* na presença de três gargalos na linha e que apresentou menores WIP até a presença de dois gargalos na linha.

Como conclusão geral para os cenários analisados nessa seção há:

- Quando não há gargalos na linha, o TBC e o *kanban* obtiveram o melhor comportamento. À medida que aparecem gargalos na linha, o TBC ou o *kanban* mantiveram os melhores desempenhos, sendo que para a maior quantidade de gargalos o CONWIP se comportou melhor.

7.6 Análise do cenário com alteração na variedade de itens a serem produzidos

A finalidade desse experimento é observar como o *throughput* e o WIP do CONWIP, *kanban* e TBC se comportariam perante alterações na quantidade de tipos de itens a serem produzidos. No modelo atual da empresa há a produção de sete tipos de eixos diferentes. Considerou-se, também, a produção de apenas um tipo de item, indicando um ambiente de produção sem variedade de mix. Ainda, representou-se a produção de maior variedade de mix (o dobro da quantidade de tipos de itens do cenário atual da linha de eixos traseiros).

Como pode ser notado na Tabela 7.9 e na Figura 7.9, os *throughputs* dos sistemas permanecem iguais quando a quantidade de tipos de itens é única e pequena variedade (sete tipos de itens). No entanto, quando se aumenta a quantidade de tipos de itens, o sistema com maior *throughput* passa a ser o *kanban*, seguido do TBC e do CONWIP.

Na Tabela 7.10 e na Figura 7.10 ficam evidentes os desempenhos dos sistemas quanto ao WIP médio formado. Na ausência de variedade de mix, os sistemas *kanban* e TBC geraram os menores WIP. Na produção de sete tipos de itens o TBC foi o sistema que obteve o melhor desempenho. Com o aumento da variedade para 14 tipos de eixos, o CONWIP passou a apresentar o menor WIP médio.

Tabela 7.9 – *Throughput* obtido com alteração na variedade de itens a serem produzidos

Quantidade de itens	<i>Throughput</i> (eixos/dia)	CONWIP	Kanban	TBC
1	Média	112	112	112
	Mínimo	95	97	97
	Máximo	115	114	114
	Desvio padrão	2,72	3,07	3,07
	<i>Half-width</i>	0,439	0,495	0,495
7	Média	119	119	119
	Mínimo	101	103	102
	Máximo	130	130	130
	Desvio padrão	7,66	7,18	7,42
	<i>Half-width</i>	1,24	1,16	1,2
14	Média	116	119	118
	Mínimo	93	95	95
	Máximo	124	123	122
	Desvio padrão	6,16	5,08	4,97
	<i>Half-width</i>	0,994	0,82	0,802

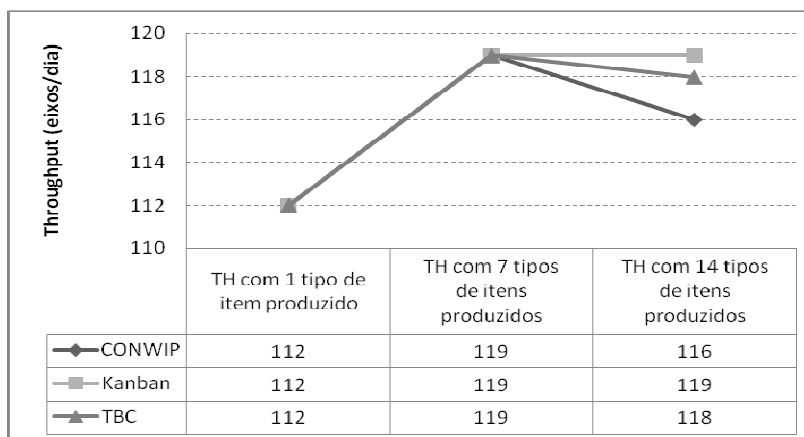
Figura 7.9 – *Throughput* obtido com alteração na variedade de itens a serem produzidos

Tabela 7.10 – WIP obtido com alteração na variedade de itens a serem produzidos

Quantidade de itens	WIP (eixos)	CONWIP	Kanban	TBC
1	Média	4,88	0,177	0,177
	Mínimo	3,58	0,0782	0,0782
	Máximo	5,25	0,367	0,367
	Desvio padrão	0,275	0,0747	0,0745
	<i>Half-width</i>	0,0444	0,012	0,012
7	Média	3,76	1,75	1,67
	Mínimo	2,04	0,955	0,942
	Máximo	4,34	2,79	2,31
	Desvio padrão	0,498	0,31	0,255
	<i>Half-width</i>	0,0803	0,0499	0,0412
14	Média	4,33	5,48	5,0
	Mínimo	2,83	1,73	1,73
	Máximo	4,74	6,61	5,78
	Desvio padrão	0,356	0,791	0,626
	<i>Half-width</i>	0,0575	0,128	0,101

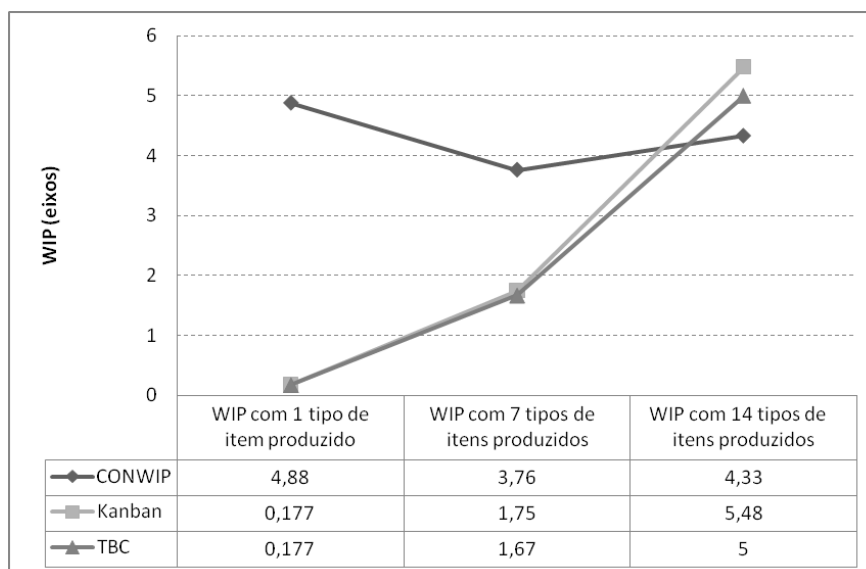


Figura 7.10 – WIP obtido com alteração na variedade de itens a serem produzidos

Quando houve a análise dos valores obtidos de *throughput* e WIP por meio da ANOVA e pelo método de Scheffé, verificou-se que (vide Apêndice A):

- Para a produção de um e sete tipos de itens, os valores médios de *throughput* foram considerados iguais. Para 14 tipos de itens, os valores médios de *throughput* foram considerados iguais para o *kanban* e para o TBC (sistemas com melhores desempenhos);
- Os valores médios de WIP do *kanban* e do TBC foram considerados iguais para a produção de um e sete tipos de itens. Para a produção de 14 tipos de itens, o CONWIP obteve o melhor valor, pois a média foi considerada diferente do segundo melhor sistema.

Bonvik, Couch e Gershwin (1997), para cenário de produção de único tipo de item, verificaram que o *kanban* manteve maior estoque internamente a linha do que as outras políticas analisadas, incluindo CONWIP e TBC. Aqui, notou-se que o CONWIP possuiu maior WIP do que os demais SCO nesse mesmo cenário, contrapondo os resultados encontrados por esses autores.

Krishnamurthy, Suri e Vernon (2004) averiguaram que o *kanban*, para produção de pequena variedade de produtos (oito itens), não apresentou melhor desempenho para nível de serviço e nível médio de estoque. Nesse mesmo contexto, na atual pesquisa também foi verificado que o *kanban* apresentou os melhores valores para WIP em conjunto com o TBC. Já para o nível de serviço, os resultados foram os mesmos para todos os SCO, considerando total de saídas de 119 eixos e demanda de 130 eixos (nível de serviço de aproximadamente 0,92).

Khojasteh-Ghamari (2009), também com cenário de produção de um tipo de item, encontraram que o *throughput* do *kanban* e do CONWIP foi idêntico, pois ambos os sistemas tiveram a mesma distribuição de tempos de processamento e condições iniciais, fato corroborado na presente tese, ao se considerar o *throughput* diário de 112 peças para o mesmo cenário.

Na pesquisa de Wang, Cao e Kong (2009), para cenário com um tipo de item, os sistemas CONWIP e TBC não obtiveram o melhor desempenho dentre os sistemas comparados, no entanto, o TBC foi o segundo melhor sistema para todas as medidas consideradas, sendo que WIP e saídas do sistema são as medidas compatíveis com a atual pesquisa. Complementando esses resultados, aqui se verificou que o TBC obteve melhores resultados para WIP e as saídas do sistema foram iguais.

A conclusão geral para os cenários testados nessa seção é a que segue:

- O desempenho do TBC continuou melhor mesmo com razoável variedade de itens a serem produzidos. No entanto, o CONWIP apresentou melhor WIP para a maior variedade de itens.

7.7 Análise dos resultados

O resumo dos principais resultados encontrados nesse capítulo está na Figura 7.11. Trata-se de um mapa mental (*mind map*) no qual somente são expostos os sistemas que obtiveram os melhores valores para determinada medida de desempenho, após efetuação da ANOVA e do método de comparações múltiplas de Scheffé. Foram considerados os passos para elaboração de um mapa mental de acordo com Thinkbuzan (2012). Houve a decisão sobre o tema do mapa mental para formar a ideia central (que é explicitada no centro da figura). As principais ideias em torno do tema central são explicitadas ao redor deste, por meio de ramificações. Após isso, ramificações secundárias são adicionadas com o intuito de expandir as ideias principais, sendo que não há limites de números de reamificações a serem utilizadas.

Assim na Figura 7.11, por exemplo, no cenário de demanda sob diversos CV, para CV 1, o CONWIP, o *kanban* e o TBC proporcionaram os maiores *throughputs* e o TBC o menor WIP. Ressalta-se que o intento aqui não é o de focar em *tradeoffs* que possam existir entre essas duas medidas de desempenho, e sim, expor de forma organizada e resumida os resultados chave encontrados nas simulações efetuadas, apresentando características que auxiliem na escolha de SCO.

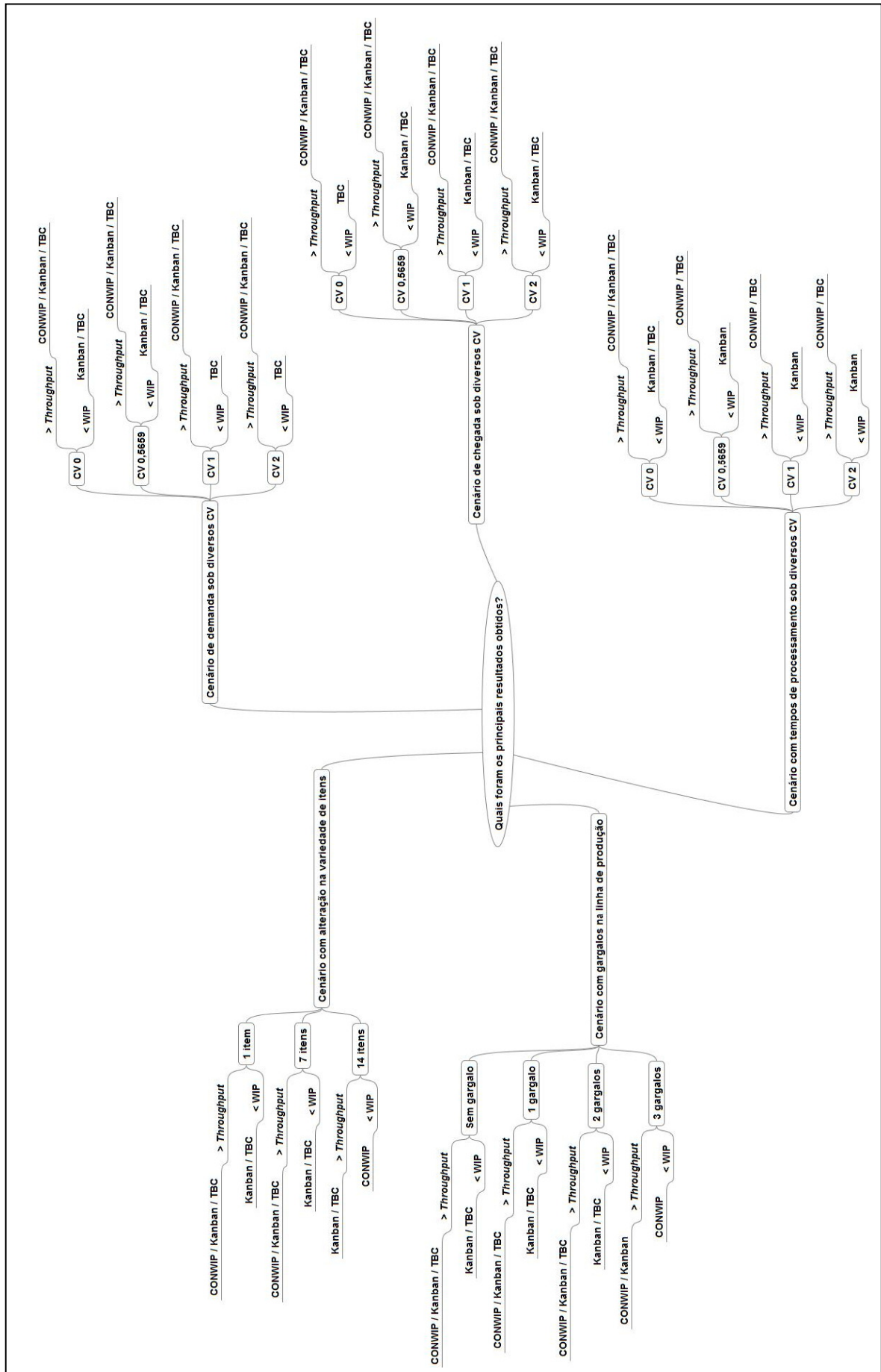


Figura 7.11 – Mapa mental (*mind map*) dos principais resultados obtidos nesse capítulo

Em uma análise geral, o CONWIP esteve presente como gerador de maior *throughput* em 18 dos 19 cenários rodados (não obteve maior *throughput* somente no cenário de 14 tipos de itens a serem produzidos). Portanto, a vantagem do CONWIP de fornecer melhor *throughput*, discutida por autores como Gaury, Pierreval e Kleijen (2000) e Spearman *et al.* (1990), foi confirmada na presente pesquisa. Ressalta-se que o TBC também esteve presente como gerador de maior *throughput* em 18 cenários, o que também confirma essa vantagem apontada por Bonvik, Couch e Gershwin (1997).

Já para WIP, o TBC apresentou os menores valores em 14 dos 19 cenários testados, juntamente com o *kanban*. Assim, a superioridade do TBC em produzir menores WIP com maior *throughput* devido à combinação de vantagens do CONWIP e do *kanban*, conforme Bonvik, Couch e Gershwin (1997) e Bonvik (1996) *apud* Gaury, Pierreval e Kleijen (2000), também foi notada.

Outro ponto a ser observado é que o *kanban* apresentou melhor desempenho quanto a WIP e/ou *throughput* em cenários com altos coeficientes de variação de chegada e tempos de processamento, maior variedade de itens e com presença de gargalos na linha, o que divergiu de afirmações, como de Gelders e Wassenhove (1985), que pregam a necessidade de um ambiente mais estável para utilização desse sistema.

Ao avaliar os cenários separadamente, foram os seguintes pontos merecem destaque:

- Demanda sob diversos CV: O TBC se mostrou melhor para gerar menores WIP para todos CV.
- Chegada sob diversos CV: O TBC se mostrou melhor quanto à formação de WIP para todos os CV e o *kanban* para cenários com maiores CV.
- Tempos de processamento sob diversos CV: Quanto ao WIP, o *kanban* obteve melhor desempenho para todos os CV. O CONWIP e o TBC alcançaram os melhores *throughputs* para todos os CV.
- Ausência e presença de gargalo(s) na linha de produção: O TBC e o *kanban* foram os SCO que proporcionaram os menores WIP quando não havia gargalos e na presença de um e dois gargalos. A respeito do *throughput*, tanto o CONWIP quanto o *kanban* obtiveram os melhores valores na ausência e na presença de gargalo(s).
- Alteração na variedade de itens: O *kanban* e o TBC se mostraram os SCO com melhores desempenhos para *throughput* para todas as quantidades de tipos de itens a serem produzidos na linha e também para melhor WIP na produção de um e sete tipos de itens.

No entanto, para produção de maior variedade (14 tipos de itens) o CONWIP apresentou menor WIP.

7.8 Considerações finais

Nesse capítulo, apresentou-se a análise do desempenho dos sistemas CONWIP, *kanban* e TBC sob diferentes cenários. As medidas enfocadas nesse capítulo foram *throughput* médio e WIP médio, que são medidas muito utilizadas em trabalhos afins com o tema dessa tese (como exposto no Capítulo 4).

Os cenários foram elaborados para verificar os impactos nessas medidas com alterações nos coeficientes de variação da formação de demanda, da chegada dos eixos no início da linha e dos tempos de processamento. Dentre os CV, foram testados coeficientes considerados muito altos (1 e 2) no intuito de verificar o impacto em situações consideradas muito desfavoráveis para os sistemas puxados. Também foram considerados os cenários de variação na quantidade de gargalos na linha e de variedade de mix de eixos a serem produzidos. Esses cenários propiciaram algumas comparações com resultados encontrados em trabalhos expostos no Capítulo 4.

Observa-se que, em alguns momentos, os sistemas TBC e *kanban* proporcionaram resultados próximos ou iguais. Esses eventos podem ter sido influenciados pela configuração utilizada do TBC na lógica programada, na qual se utilizaram as sugestões dos autores Bonvik, Couch e Gershwin (1997), precursores de estudos sobre esse tipo de sistema híbrido. Assim, o controle *kanban* predomina o funcionamento da lógica do TBC em quatro estações de trabalho, sendo que o CONWIP influencia mais no funcionamento da quinta estação, a qual não possui *kanban*, apesar do cartão CONWIP seguir a linha toda juntamente com os cartões *kanban* respectivos de cada estação de trabalho.

Ressalta-se que há trabalhos, como de Gaury, Pierreval e Kleijen (2000), que utilizam algoritmos evolucionários para identificar a melhor configuração de sistemas híbridos, ou seja, em quais e quantas estações de trabalho utilizar o controle *kanban* e quantos cartões *kanban* e CONWIP utilizar na melhor configuração.

Cabe salientar que os resultados aqui encontrados não se tornam um guia para aplicação de sistemas puxados. Para a tomada de tal decisão nas empresas, é necessário realizar novos estudos de acordo com a análise do sistema real em questão, como também

advogado por Gaury, Pierreval e Kleijen (2000). Assim, deve-se projetar, simular e analisar cenários de acordo com os objetivos pretendidos pelo gestor de produção.

Na presente tese, a simulação de sistemas mostrou-se, e vem se mostrando cada vez mais nas empresas, uma técnica da pesquisa operacional muito indicada e viável para realização de estudos para apoio a tomada de decisões.

Esse capítulo possui como principal contribuição a apresentação de informações relevantes para a literatura de engenharia de produção sobre o desempenho de sistemas de coordenação de ordens puxados. Ainda, apresenta uma abordagem de análise e comparação de sistemas que pode ser seguida pelas empresas durante a decisão de qual sistema puxado adotar.

CAPÍTULO 8 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

As considerações finais do trabalho são apontadas nesse capítulo. Para melhor organização do conteúdo, as considerações dessa tese foram subdivididas nas seguintes seções: i) a seção 8.1 explicita as considerações gerais; ii) na seção 8.2 há a avaliação geral do objetivo e da proposição; iii) a seção 8.3 expõe uma comparação da tese com trabalhos que analisaram conjuntamente os SCO puxados CONWIP, *kanban* e TBC; iv) a seção 8.4 apresenta as contribuições do trabalho e propostas de pesquisas futuras.

8.1 Considerações Gerais

Por meio da realização desse trabalho, conseguiu-se responder as questões de pesquisa levantadas no Capítulo 1, como segue:

- 1) Quais medidas de desempenho são mais consideradas para a comparação dos sistemas de coordenação de ordens aplicados em ambientes *flow shop*, a serem considerados? Verificou-se no Capítulo 4, que as medidas de desempenho mais utilizadas foram WIP, *throughput*, estoque total e nível de serviço. No entanto, verificou-se que não é uma regra o uso dessas medidas para análise de todos os sistemas, sendo que nos trabalhos analisados, identificou-se o uso de 34 medidas de desempenho. Gaury, Pierreval e Klejien (2000) afirmaram que, para as comparações dos SCO (nomeados pelos autores como estratégias de controle da produção), devem-se utilizar medidas de desempenho condizentes com os sistemas.
- 2) Até que ponto determinado SCO pode ser vantajoso para determinada empresa, considerando certas medidas de desempenho? Com base nos resultados encontrados no capítulo 6, que são voltados para a realidade da empresa estudada, notou-se que dependendo da medida de desempenho, em determinado cenário, um sistema se mostrou mais propício do que outro. Essa afirmação vai de acordo com MacDonald e Gunn (2008), que advogam que a escolha da melhor estratégia de controle depende do desempenho desejado para o sistema analisado. Nesse capítulo, verificou-se a superioridade dos sistemas puxados frente ao empurrado, sendo que o TBC apresentou, de um modo geral, o melhor desempenho. Já no capítulo 7, focou-se na análise dos sistemas puxados frente às medidas de desempenho WIP e *throughput* para os cenários de demanda, chegada dos eixos e tempos de processamento sob

diversos coeficientes de variação, gargalo(s) na linha de produção, e alteração na variedade de produtos. Verificou-se, na maioria dos resultados encontrados, que o CONWIP proporcionou maior *throughput* e o TBC obteve menor WIP.

Percebeu-se, também, a confirmação de algumas vantagens dos sistemas puxados que foram delimitadas no capítulo 3. Para o sistema CONWIP, as seguintes vantagens listadas por Ovalle e Marquez (2003) foram observadas:

- O CONWIP apresentou-se mais simples que os demais sistemas, devido à configuração única de controle de cartão, sem a necessidade de controlar os cartões em cada estação de trabalho;
- Mostrou-se aplicável em ambientes *flow shop* e lidou bem com variedade de mix de produtos quanto à forma do controle realizado;
- Quando comparado com o sistema empurrado, apresentou menores WIP e tempo de fluxo.

Também se confirmou a vantagem do CONWIP observada por Gaury, Pierreval e Kleijen (2000) e Spearman *et al.* (1990), que é a capacidade de fornecer melhor *throughput*, como encontrado no capítulo 7.

Entretanto, para os cenários levados em conta, o CONWIP não apresentou os melhores resultados para WIP em 17 dos 19 cenários, ao se comparar com o desempenho do *kanban* e do TBC. Somente gerou melhor WIP para os cenários com maior variedade de itens a serem produzidos e maior número de gargalos na linha.

As vantagens do *kanban*, enumeradas por Gaury, Pierreval e Kleijnen (2000) e Lage Junior e Godinho Filho (2009), que foram observadas na pesquisa realizada foram:

- Controle eficiente dos estágios produtivos, nos quais houve a entrada na estação de trabalho somente da peça demandada em cada estação;
- Ao se comparar o *kanban* com o sistema empurrado e com o CONWIP, este apresentou considerável redução dos níveis de estoque e dos tempos de fluxo, propiciando assim uma redução dos *lead times*.

Contudo, verificou-se como Monden (1998) *apud* Nazareno (2008), que o *kanban* é menos adaptável a variações na demanda. Esse fato foi confirmado ao notar que o *kanban* não obteve os melhores valores para WIP para maiores coeficientes de variação na formação da demanda.

Quanto à vantagem observada do TBC e que foi citada por Bonvik, Couch e Gershwin (1997) e Ovalle e Marquez (2003), está:

- Desempenho superior com estoques mínimos. Este fato foi confirmado, uma vez que nos cenários do capítulo 7 o TBC propiciou melhores *throughput* e WIP. Ainda, no capítulo 6

observou-se que o TBC apresentou melhores valores na grande maioria das medidas de desempenho utilizadas. Salienta-se que, nessa pesquisa, o *kanban* também apresentou desempenho superior, em grande parte, juntamente com o TBC.

Apesar de o TBC ter apresentado bom desempenho para boa parte das medidas consideradas nessa pesquisa, notou-se, como Samaratunga, Sethi e Zhou (1997), que o sistema de controle é mais complexo, devido ao uso de características de dois sistemas.

8.2 Avaliação Geral do Objetivo e da Proposição

A avaliação dos objetivos da pesquisa e a refutação/corroboração da proposição levantada são realizadas nessa seção.

O objetivo de analisar e comparar o desempenho dos sistemas de coordenação de ordens *Kanban*, CONWIP e TBC (*Kanban-CONWIP*), segundo parâmetros preestabelecidos, em um caso real que possui ambiente de produção *flow shop* e propor um mapa mental (*mind map*) com características que auxiliem na escolha de SCO foi alcançado e superado. Durante o processo de modelagem e simulação do ambiente real da empresa, verificou-se que este representava um sistema empurrado, assim, foi possível comparar os três SCO puxados juntamente com o sistema empurrado. As características que foram abordadas nessa tese foram a capacidade dos sistemas em lidar com alterações nos coeficientes de variação da demanda, da chegada e do tempo de processamento, com a presença de gargalo(s) na linha e com quantidades diferentes de tipos de itens a serem produzidos na linha. Por meio da análise e comparação dos sistemas puxados, foi possível elaborar um mapa mental com características que possam auxiliar na escolha de SCO.

Observa-se que os objetivos específicos foram efetuados com sucesso, a saber:

- i) Aprofundar o conhecimento em sistemas de coordenação de ordens aplicados em ambientes *flow shop*: esse objetivo específico foi atingido por meio dos capítulos 2, 3 e 4. No decorrer do capítulo 2 houve a contextualização do controle da produção como atividade de PCP, onde se enquadram os sistemas de coordenação de ordens. No capítulo 3 focou-se em alguns SCO mais discutidos na literatura de engenharia de produção, sendo o MRP, o *kanban*, o CONWIP, o BSCS (estoque-base), o TBC e o GKCS. No Capítulo 4 houve a exposição dos trabalhos que relacionam um ou mais SCO em ambientes *flow shop* com uso de simulação, o qual auxiliou a encontrar quais sistemas seriam enfocados nessa tese.
- ii) Simular SCO com base em um caso real de ambiente *flow shop*: esse objetivo foi alcançado, uma vez que nos capítulos 5 e 6 foram mostrados os processos de modelagem e

simulação para os SCO foco da tese, baseados no cenário real de uma empresa automobilística. O capítulo 5 enfatizou a modelagem e simulação do cenário atual da linha de eixos traseiros, caracterizada como sistema empurrado. Já no capítulo 6 houve a modelagem e simulação dos sistemas CONWIP, *kanban* e TBC considerando a realidade da empresa estudada.

iii) Verificar o desempenho dos SCO simulados com base em parâmetros preestabelecidos: os capítulos 6 e 7 contribuíram para alcançar esse objetivo. No capítulo 6 foram feitas análises dos sistemas empurrado (situação atual da empresa), CONWIP, *kanban* e TBC de acordo com as medidas de desempenho: total de saídas, tempo de fluxo, utilização dos operadores, estoque intermediário e tempo de fila. Nesse capítulo preocupou-se em representar os sistemas de acordo com a realidade da empresa em questão. Já no Capítulo 7 foram feitas outras análises e comparações com foco nos sistemas puxados, extrapolando as configurações reais da empresa, com o intuito de testar o desempenho dos sistemas perante algumas mudanças no ambiente produtivo. Para tanto, foram consideradas alterações no coeficiente de variação da demanda, da chegada e do tempo de processamento, presença de gargalo(s) e variação na quantidade de tipos de itens a serem produzidos. As médias de desempenho usadas nesse capítulo foram WIP e *throughput*.

Assim, ao alcançar o objetivo geral com a realização dos objetivos específicos, foi possível refutar ou corroborar a proposição levantada no capítulo 1, como segue:

- Proposição **corroborada**: A seleção do melhor sistema de coordenação de ordens depende das características do sistema produtivo. Ao analisar os sistemas testados nessa tese, verificou-se que o comportamento deles é melhor ou pior dependendo da medida de desempenho e das configurações do sistema. Por exemplo, como explicitado e resumido na seção 7.7 (Capítulo 7), nessa pesquisa encontrou-se que os sistemas *kanban* e TBC apresentaram melhores *throughputs* e o CONWIP melhor WIP quando houve produção de 14 tipos de itens. Ainda, quando houve a presença de um gargalo na linha, os melhores *throughputs* foram gerados pelos sistemas CONWIP, *kanban* e TBC, e os melhores WIP pelos sistemas *kanban* e TBC.

8.3 Comparação da tese com trabalhos que analisaram conjuntamente os SCO puxados

Um comparativo entre os trabalhos mais compatíveis quanto aos sistemas de coordenação de ordens tratados nessa tese (TBC, *kanban* e CONWIP) foi elaborado com base nos quadros 8.1 e 8.2. Esse confronto considerou se o caso analisado nos trabalhos é real ou

hipotético, o número de centros de trabalho considerados, os tipos de itens produzidos, as medidas de desempenho utilizadas, demais configurações presentes no modelo, o objetivo do trabalho e a forma de análise/procedimentos realizados.

Quadro 8.1 – Comparativo entre os trabalhos com análises dos SCO tratados na tese

Autores	Real ou Hipotético	Nº centros de trabalho	Tipos de itens	Medidas de desempenho	Demais configurações
Bonvik, Couch e Gershwin (1997)	Real	4	1	Nível de serviço, nível de WIP e variabilidade ao longo da linha	Tamanho do <i>buffer</i> , nível de estoque-base, falha de máquina e alteração da taxa de demanda
Gaury, Pierreval e Kleijnen (2000)	Hipotético	6, 8 e 10	1	WIP e nível de serviço	Número de cartões <i>kanban</i> e número de cartões CONWIP
Paternina-Arboleda e Das (2001)	Hipotético	4	1	Nível médio de WIP, nível de serviço e custo médio de WIP	Falhas e demanda não satisfeita é perda
Tese	Real	5	1, 7 e 14	Tempo médio de fluxo, estoque intermediário médio, tempo médio de fila, total médio de saídas, utilização dos operadores, WIP médio e <i>throughput</i> médio	Número de cartões <i>kanban</i> e de cartões CONWIP, considera a ociosidade de operadores exigida pela lei trabalhista, trabalho realizado manualmente, gargalo(s), alterações nos coeficientes de variação da demanda, da chegada e do tempo de processamento

Quadro 8.2 – Continuação do comparativo entre os trabalhos com análises dos SCO tratados na tese

Autores	Objetivo	Análises/Procedimentos realizados
Bonvik, Couch e Gershwin (1997)	Estudar o desempenho do Kanban, Minimal blocking, estoque-base, CONWIP e TBC (kanban-CONWIP) em uma linha de produção que produz itens para uma linha de montagem automobilística.	Por meio de simulação, a melhor configuração do tamanho dos buffers e do nível de estoque-base para cada política de controle, para alcançar os objetivos almejados. Mostrou graficamente o tradeoff entre nível de serviço e estoque para o Kanban e TBC. Determinou graficamente a localização dos estoques, confrontando os níveis médios e o número do buffer. Confrontou graficamente o desvio padrão com as máquinas para mostrar a evolução da variabilidade dos tempos entre cargas de eventos. Comparou graficamente o comportamento dos estoques de produtos acabados, de WIP e do nível do Buffer 3 com o passar do tempo de simulação levando em conta a mudança na taxa de demanda.
Gaury, Pierreval e Kleijnen (2000)	Propor uma nova abordagem que permita ambas seleções de estratégias de controle Kanban, Conwip e Kanban/Conwip híbrido e a determinação dos valores dos respectivos parâmetros, para otimizar um dado desempenho para um dado sistema de produção.	Utilizou algoritmo evolucionário para a otimização do número de cartões kanban e CONWIP para adquirir o menor WIP para determinado nível de serviço. Os modelos do kanban, do CONWIP e do TBC foram elaborados e simulados por meio de um modelo genérico desenvolvido para gerarem os dados para a otimização.
Paternina-Arboleda e Das (2001)	Desenvolver uma metodologia que, para um dado sistema, encontre uma política de controle dinâmica via agentes inteligentes.	Simulou os sistemas com base nas configurações recomendadas por Bonvik et al. (1997), considerando taxas de demanda constante e segundo a distribuição poisson. Os sistemas kanban, CONWIP e TBC foram simulados somente no cenário de demanda constante. O modelo de simulação foi usado como um veículo para implementação do algoritmo SMART a fim de obter políticas dinâmicas de controle.
Tese	Comparar os sistemas de coordenação de ordens <i>Kanban</i> , CONWIP e TBC (<i>Kanban</i> -CONWIP) em um caso real que possui ambiente de produção <i>flow shop</i> e propor um mapa mental (<i>mind map</i>) com características que auxiliem na escolha de SCO.	Simulou os sistemas puxados com base nas configurações do sistema real da empresa estudada (empresa automobilística) e nas recomendações dos autores Bonvik et al. (1997), Spearman et al. (1990) e Marek, Elkins e Smith (2001). Para os sistemas empurrado, CONWIP, <i>kanban</i> e TBC, foram feitas análises e comparações do total de saídas, tempo de fluxo, utilização dos operadores, estoque intermediário e tempo de fila para o caso real da empresa. Os sistemas puxados foram otimizados por meio do algoritmo <i>Scatter Search</i> presente no software OptQuest para determinação da melhor configuração da quantidade de cartões. Ainda, para os sistemas puxados, foram feitas análises e comparações dos cenários de alteração dos coeficientes de variação da demanda, da chegada e do tempo de processamento, presença de gargalo(s) na linha e alteração na quantidade de tipos de itens a serem produzidos, com a finalidade de identificar características que favoreçam ou não a implantação do CONWIP, <i>kanban</i> e TBC. Também, foi efetuada a análise estatística ANOVA e o método de comparações múltiplas de Scheffé.

Observa-se que a presente pesquisa diferencia-se quanto à quantidade de itens simulados no modelo. Os trabalhos de Bonvik, Couch e Gershwin (1997), Gaury, Pierreval e Kleijnen (2000) e Paternina-Arboleda e Das (2001) utilizaram somente um item no modelo elaborado, enquanto a tese utilizou uma ordem de produção que possuía sete modelos de eixos diferentes, nos quais grupos de eixos possuem diferentes tempos de processamento. A linha de produção estudada suporta até 10 modelos distintos. Também, foram feitos cenários com a variação de 14 tipos de itens e também para único tipo.

No que tange as medidas de desempenho, os outros autores concentraram as análises, ou parte delas, em nível de serviço, WIP, custo de WIP e variabilidade ao longo da linha. Nesta pesquisa foram utilizadas as medidas tempo médio de fluxo, estoque intermediário médio, tempo médio de fila, total médio de saídas, utilização dos operadores, WIP e *throughput*.

Ainda, na tese foram utilizadas outras configurações diferentes como a restrição na utilização de operadores. Nas outras pesquisas, consideram-se máquinas nos centros de trabalho e nesta os trabalhos são manuais, realizados por operadores localizados em estações de trabalho. Sendo assim, há legislação envolvida quanto ao máximo permitido de operação dos funcionários presentes na linha (nesse caso é de 85% de utilização). Também, foram consideradas alterações nos coeficientes de variação da formação da demanda, da chegada dos eixos no início da linha e dos tempos de processamento e presença de gargalo(s) na linha.

Também, o foco dessa tese foi na comparação dos sistemas de coordenação de ordens CONWIP, *kanban* e TBC, em um caso real, e na determinação de características que favoreçam a implantação destes. Os trabalhos de Gaury, Pierreval e Kleijnen (2000) e de Paternina-Arboleda e Das (2001) focaram em casos hipotéticos e no uso de algoritmo evolucionário/agentes inteligentes para propor abordagens e metodologias para seleção de sistemas. Bonvik, Couch e Gershwin (1997) também desenvolveram um caso real em uma empresa automobilística com o intuito de comparar esses sistemas, no entanto, a presente tese ampliou a discussão ao comparar também, no caso real, o sistema empurrado com os três sistemas puxados (a comparação desses sistemas em conjunto não havia sido realizada). Ainda, foram utilizadas mais medidas de desempenho e projetados diversos cenários para testar esses sistemas em condições citadas na literatura de engenharia de produção como favoráveis ou desfavoráveis para a implantação e realizados os testes estatísticos ANOVA e método de Scheffé, pontos que não haviam sido realizados em tais trabalhos.

8.4 Contribuições do Trabalho e Propostas de Pesquisas Futuras

As contribuições pontuais que essa tese proporciona, para a literatura de engenharia de produção e para o meio empresarial, foram explicitadas no final de cada capítulo. Nessa seção, as contribuições gerais da tese são apontadas de forma resumida e agrupada, a saber:

- Contextualiza os sistemas de coordenação de ordens perante as atividades de planejamento e controle da produção, mais especificamente quanto às atividades de controle da produção;
- Aponta possível uso da simulação computacional como ferramenta de auxílio ao ensino e aprendizagem, tanto na empresa para treinamentos, quanto no meio acadêmico como recurso didático em aulas, por exemplo, para visualização prática de conceitos de PCP;
- Apresenta informações importantes sobre o desempenho dos sistemas puxados CONWIP, *kanban* e TBC, sendo que estas podem ser consideradas pelas empresas durante a elaboração dos próprios modelos a serem usados no processo de seleção de qual sistema puxado adotar;
- Gera informações relevantes para a literatura de engenharia de produção, sobre o desempenho dos SCO CONWIP, *kanban*, TBC e também do sistema empurrado em determinadas configurações de produção;
- Para a empresa que participou da pesquisa, foi possível verificar a situação atual da linha de eixos traseiros e também analisar o desempenho de outros SCO antes da implantação real destes;
- Motiva a realização de novas pesquisas sobre análise e comparação de sistemas de coordenação de ordens via simulação computacional, seja em ambientes reais ou em casos hipotéticos.

As propostas de pesquisas futuras são listadas a seguir:

- ✓ Simular e analisar outros sistemas de coordenação de ordens para ampliar as comparações realizadas nessa tese;

- ✓ Elaborar um método prático via simulação de sistemas, que auxilie as empresas a conduzirem o processo de tomada de decisão quanto a qual SCO adotar em toda ou parte da linha de produção;
- ✓ Realizar análises em empresas brasileiras para identificação da convergência/divergência do uso dos SCO mais adequados e, assim, cada vez mais ampliar a divulgação deste tema na literatura;
- ✓ Efetuar uma pesquisa-ação com intuito de implementar e implantar cenários de melhoria na prática empresarial e verificar os benefícios que possam surgir.
- ✓ Desenvolver um método baseado em simulação que auxilie no ensino/aprendizagem de sistemas de coordenação de ordens nas aulas de planejamento e controle da produção.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADAMCZYK, R.; ZIELIŃSKI, K. **Optymalizacja pracy w systemie *just-in-time* w technologii *kanban***. 12 p. 2008. Disponível em: <<http://diablo.ict.pwr.wroc.pl/~radamczy/Kanban.pdf>>. Acesso em: 10 set. 2012.

AGARWAL, A.; SARKIS, J. A review and analysis of comparative performance studies on functional and cellular manufacturing layouts. **Computers ind. Engng**, vol. 34, no. 1, pp. 77-89, 1998.

AKTURK, M. S.; ERHUN, F. An overview of design and operational issues of kanban systems. **International Journal of Production Research**, vol. 37, no. 17, pp. 3859-3881, 1999.

BACHEGA, S. J. ; GODINHO FILHO, M. **Caracterização dos tipos de integração atualmente existentes na literatura de gestão da manufatura**. In: XII Simpósio de Engenharia de Produção, 2005, Bauru-SP. SIMPEP, 2005.

BANKS, J.; CARSON, J. S.; NELSON, B. L. Discrete-event system simulation. New Jersey: Prentice Hall, 1996. 548 p.

BARBETTA, P. A.; REIS, M. M.; BORNIA, A. C. **Estatística para cursos de engenharia e informática**. São Paulo: Atlas, 2004.

BAYNAT, B.; BUZACOTT, J. A.; DALLERY, Y. Multiproduct Kanban-Like Control Systems. **International Journal of Production Research**, v. 40, n. 16, p. 4225-4255, 2002.

BELGE. **Cases**. Disponível em: <<http://www.belge.com.br/cases.php>>. Acesso em: 09 out. 2011.

BERENDS, P.; ROMME, G. Simulation as a research tool in management studies. **European Management Journal** , v.17, n.6, pp.576–583, 1999.

BERTO, R. M. V. S.; NAKANO, D. N. A produção científica nos anais do encontro nacional de engenharia de produção: um levantamento dos métodos e tipos de pesquisa. **Produção**, v. 9, nº 2, p. 65-75, jul. 2000.

BERTO, R. M. V. S.; NAKANO, D. N. Metodologia da pesquisa e a engenharia de produção. In: XVIII Encontro Nacional de Engenharia de Produção (ENEGEP) e IV International Congress of Industrial Engineering (ICIE), 1998, Niterói, RJ. **Anais...Niterói: UFF/ABEPRO**, out. 1998. 1 CD-ROM.

BICHENO, J. **The new lean toolbox: towards fast, flexible flow**. Buckingham: PICSIE Books, 2004.

BLAIR, B. J. A review of the kanban production control research literature. **Production and Operations Management**, v. 1, p. 393–411, 1992.

BONVIK, A. M.; COUCH, C. E.; GERSHWIN, S. B. A comparison of production-line control mechanisms. **International Journal of Production Research**, vol. 35, n. 3, pp. 789-804, 1997.

BOONLERTVANICH, K. **Extended-CONWIP-Kanban System: Control and Performance Analysis**. 2005. 260 p. Thesis (Doctor of Philosophy in the School of Industrial and System Engineering) – Georgia Institute of Technology. 2005.

BRYMAN, A. **Research methods and organization studies**. London: Uniwin Hyman, 1989. 224 p.

BUFFA, E. S.; SARIN, R. K. **Modern Production/Operations Management**. 8^a ed. John Wiley & Sons, 1987. 834 p.

BURBIDGE, J. L. **Planejamento e controle da produção**. 2.ed. São Paulo: Atlas, 1988. 556p.

BURBIDGE, J.L.: Production Control: a universal conceptual framework. **Production Planning and Control**, vol. 1, n.1, pp. 3-16, 1990.

BUZACOTT, J. A. Queueing models of kanban and MRP controlled production systems. **Engineering Cost and Production Economics**, 17, pp. 03-20. 1989.

CARVALHO, M. C. M. de. A construção do saber científico: algumas proposições. In: CARVALHO, M. C. M. de (org.). **Construindo o saber**. 2.ed. Campinas, SP: Papirus. pp.63-86. 2000.

CHAKRAVORTY, S. S.; ATWATER, J. B. A comparative study of line design approaches for serial production systems. **International Journal of Operations & Production Management**, vol. 16, no. 6, pp.91-108, 1996.

CHAKRAVORTY, S. S.; ATWATER, J. B.: The impact of free goods on the performance of drum-buffer-rope scheduling systems. **International Journal of Production Economics**, vol. 95, pp. 347-357, 2005.

CHERAGHI, S. H.; DADASHZADEH, M.; SOPPIN, M. Comparative analysis of production control systems through simulation. **Journal of Business & Economics Research**, vol. 6, no. 15, pp. 87-104, 2008.

CHIAVENATO, I. **Administração: teoria, processo e prática**. Rio de Janeiro: Campus, 2006.

CHIAVENATO, I. **Introdução à teoria geral da administração**. 7^a ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2003.

CHUNG, C. A. **Simulation modeling handbook: a practical approach**. CRC Press, 2003.

CHWIF, L.; MEDINA, A. C. **Modelagem e Simulação de Eventos Discretos: Teoria e Aplicações**. São Paulo: Bravarte. 2^a ed. 2007.

CLARK, A. J.; SCARF, H. Optimal policies for the multi-echelon inventory problem. **Management Science**, v. 6, n. 4, 475 - 490, 1960.

COOK, D. P. A simulation comparison of traditional, JIT, and TOC manufacturing systems in a flow shop with bottlenecks. **Production and Inventory Management Journal**, First Quarter, pp.73-78, 1994.

CORRÊA, H. L., GIANESI, I. G. N.; CAON, M. **Planejamento, programação e controle da produção: MRP II/ERP – conceitos, uso e implantação**. 4ª ed. São Paulo: Atlas, 2001.

CORRÊA, L. H., GIANESI, I. **Just-in-Time, MRP II e OPT: um enfoque estratégico**. São Paulo: Atlas, 1993. 192 p.

CRESWELL, J. W. **Research design: qualitative & quantitative approaches**. London: Sage, 1994. 248 p.

DALLERY, Y.; LIBEROPOULOS, G. Extended kanban control system: combining kanban and base stock. **IIE Transactions**, 32, pp.369-386, 2000.

DAR-EL, E. M.; HERER, Y. T.; MASIN, M. CONWIP-based production lines with multiple bottlenecks: performance and design implications. **IIE Transactions**, 31, p.99-111, 1999.

DAVIS, M. M.; AQUILANO, N. J.; CHASE, R. B. **Fundamentação da Administração da Produção**. Porto Alegre: Bookman. 2001.

DEJONCKHEERE, J.; DISNEY, S. M.; LAMBRECHT, M.; TOWILL, D. R. The dynamics of aggregate planning. **Production Planning & Control**, v. 14, n. 6, September 2003, 497–516.

DOLGUI, A; PRODHON, C. Supply planning under uncertainties in MRP environments: A state of the art. **Annual Reviews in Control**, v.31, n. 2, p. 269-279, 2007.

DUCLOS, L. K.; SPENCER, M. S. The impact of a constraint buffer in a flow shop. **International Journal of Production Economics**, 42, pp. 175-185, 1995.

DUENYAS, I.; PATANA-ANAKE, P. Base-stock control for single-product tandem make-to-stock systems. **IIE Transactions**, vol. 30, no. 1, pp. 31-39, 1998.

EMSHOFF, J. R.; SISSON, R. L. **Design and Use of Computer Simulation Models**. The Macmillan, New York, 1970.

FENABRAVE. Federação Nacional da Distribuição de Veículos Automotores. **Setor automobilístico encerra 2010 com novo recorde**, 14/06/2011. Disponível em: <http://www.fenabrave.com.br/principal/home/?sistema=conteudos|conteudo&id_conteudo=2835#conteudo>. Acesso em: 06 ago. 2011.

FERNANDES, F.C.F. **Concepção de um Sistema de Controle da Produção para a manufatura celular**. Tese de Doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos. São Carlos – SP, 1991.

FERNANDES, F.C.F.; GODINHO FILHO, M. **Planejamento e controle da produção: dos fundamentos ao essencial**. São Paulo: Atlas, 2010. 275 p.

FERNANDES, F.C.F.; GODINHO FILHO, M. Production control systems: literature review, classification, and insights regarding practical application. **African Journal of Business Management**, v. 5, n.14, pp.5573-5582, 2011.

FERNANDES, F.C.F.; GODINHO FILHO, M.: Sistemas de Coordenação de Ordens: Revisão, Classificação, Funcionamento e Aplicabilidade. **Revista Gestão & Produção**, vol. 2, n. 4, pp. 337-352, 2007.

FERNANDES, N. O. G. **Contribuições para o Controlo da Actividade de Produção no Sector de Produção por Encomenda**. 2007. 170 f. Tese (Doutoramento - Engenharia de Produção e Sistemas), Universidade do Minho – Portugal, 2007.

FREIN, Y.; DI MASCOLO, M.; DALLERY, Y. On the Design of Generalized Kanban Control Systems. **International Journal of Operations & Production Management**, v. 15, n.9, 1995. pp. 158-184.

FREIRE, G. **Estudo comparativo de modelos de estoques num ambiente com previsibilidade variável de demanda**. 2007. 105 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade de São Paulo – Escola Politécnica. 2007.

FREITAS FILHO, P. J. **Introdução à modelagem e simulação de sistemas**. Florianópolis: Visual Books. 2^a ed. 2008.

FRY, T. D.; COX, J. F.; BLACKSTONE JR, J. H. An analysis and discussion of the optimized production technology software and its use. **Production and Operations Management**, v. 1, n. 2, pp. 229-242, 1992.

FU, M. C. Optimization for simulation: theory vs. practice. **Journal on Computing**, vol. 14, n. 3, 2002.

FU, M. C. Optimization via simulation: a review. **Annals of Operations Research**, Vol. 53, pp. 199-248, 1994.

FU, M. C.; CHEN, C-H. Some topics for simulation optimization. **Proceedings...** 2008 Winter Simulation Conference, pp. 27- 38, 2008.

GAURY, E. G. A., PIERREVAL, H.; KLEIJNEN, P. C. An evolutionary approach to select a pull system among *Kanban*, Conwip and Hybrid. **Journal of Intelligent Manufacturing**, vol. 11, pp. 157-167, 2000.

GELDERS, L. F.; WASSENHOVE, L. N. Capacity planning in MRP, JIT and OPT: a critique. **Engineering costs and productions economics**, vol. 9, pp.201-209, 1985.

GERAGHTY, J.; HEAVEY, C. A comparison of Hybrid Push/Pull and CONWIP/Pull production inventory control policies. **International Journal Production Economics**, 91, pp. 75-90, 2004.

GERSHWIN, S. B. Design and operation of manufacturing systems: the control-point policy. **IIE Transactions**, 32, pp.891–906, 2000.

GHRAYEB, O.; PHOJANAMONGKOLKIJ, B.; TAN, B. A. A hybrid push/pull system in assemble-to-order manufacturing environment. **Journal of Intelligent Manufacturing**, 20, pp. 379-387, 2009.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 3^a ed. São Paulo: Atlas, 1996. 159 p.

GILLAND, W. G. A simulation study comparing performance of CONWIP and bottleneck-based release rules. **Production Planning and Control**, vol.13, no. 2, pp. 211-219, 2002.

GLOVER, F. Heuristics for integer programming using surrogate constraints. **Decision Sciences**, v. 8, p. 156-166. 1977.

GODINHO FILHO, M. **Paradigmas Estratégicos de Gestão da Manufatura**: configuração, relações com o planejamento e controle da produção e estudo exploratório na indústria de calçados. 2004. 267 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos.

GODINHO FILHO, M.; CESTARIO, J. M. Escolha de Sistemas de Coordenação de Ordens: *insights* por meio de análise da literatura que compara esses sistemas usando simulação discreta ou modelos matemáticos analíticos. Artigo enviado para avaliação na **Revista Gestão & Produção**, pp.1-27, 2008.

GOKBAYRAK, K.; SELVI, O. Constrained optimal hybrid control of a flow shop system. **IEEE Transactions on Automatic Control**, v. 52, n° 12, December, 2007, p 2270-2281.

GOLDRATT, E. M., FOX, R. E. **A corrida pela vantagem competitiva**. São Paulo: IMAM, 1993. 368 p.

GOLDRATT, E.; FOX, J. **A meta**: um processo de aprimoramento contínuo. São Paulo: Educador, 1997.

GOMES, M. L. B. **Um modelo de nivelamento da produção à demanda para a indústria de confecção do vestuário segundo os novos paradigmas da melhoria dos fluxos de processo**. 2002. 321p. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina.

GONZÁLEZ-R, P. L.; FRAMINAN, J. M. The pull evolution: from kanban to customised token-based systems. **Production Planning & Control**, vol. 20, no. 3, pp. 276-287, april 2009.

GORDON, G. **System simulation**. 2 ed. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1978.

GRANGEON, N.; TANGUY, A.; TCHERNEV, N. Generic simulation model for hybrid flow-shop. **Computers and Industrial Engineering**, v. 37, n° 1-2, Oct, 1999, p 207-210.

GSTETTNER, S.; KUHN, H. Analysis of production control systems kanban and CONWIP. **International Journal of Production Research**, vol. 34, no. 11, pp. 3253-3273, 1996.

HARREL, C. R.; MOTT, J. R. A.; BATEMAN, R. E.; BOWDEN, R. G.; GOGG, T. J. **Simulação**: otimizando os sistemas. São Paulo: Belge Simulação e IMAM. 2^a ed. 2002.

HEMAMALINI, B.; RAJENDRAN, C. Determination of the number of containers, production kanbans and withdrawal kanbans and scheduling in kanban flowshop- Part I. **International Journal of Production Research**, v. 38, n. 11, pp. 2529–2548, 2000.

HERER, Y. T.; MASIN, M. **Mathematical programming formulation of CONWIP based production lines; and relationships to MRP**. INT. J. PROD. RES., 1997, v. 35, n. 4, pp. 1067-1076.

HODGSON, T. J.; WANG, D.: Optimal hybrid push/pull control strategies for a parallel multi-stage system: Part I. **International Journal of Production Research**, vol. 29, n 6, pp. 1279-1287, 1991a.

HODGSON, T. J.; WANG, D.: Optimal hybrid push/pull control strategies for a parallel multi-stage system: Part II. **International Journal of Production Research**, vol. 29, n 7, pp. 1453-1460, 1991b.

HOPEMAN, R. J. **Production: concepts, analysis, control**. 2. ed. Stamford: Merrill, 1971. 656 p.

HOPP, W. J.; SPEARMAN, M. L. **Factory Physics: foundations of manufacturing management**. 3.ed., Chicago: Irwin/McGraw Hill, 2008.

HUANG, M.; WANG, D.; IP, W. H. Simulation study of CONWIP for a cold rolling plant. **International Journal of Production Economics**, vol. 54, pp. 257-266, 1998a.

HUANG, M.; WANG, D.; IP, W. H. A simulation and comparative study of the CONWIP, Kanban and MRP production control systems in a cold rolling plant. **Production Planning & Control**, vol. 09, no. 08, pp. 803-812, 1998b.

INGELS, D. M. **What every engineer should know about computer modeling and simulation**. New York, USA, Marcel Dekker Inc, 1985.

IUCKSCH, A. M. Simulação de sistemas de gestão de produção em manufatura sazonal. 2005. 89 f. Dissertação (Mestrado Profissionalizante em Engenharia – Escola de Engenharia), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2005.

JODLBAUER, H.; HUBER, A. Service-level performance of MRP, kanban, CONWIP and DBR due to parameter stability and environmental robustness. **International Journal of Production Research**, v. 46, n. 8, pp. 2179–2195, april 2008.

KARAESMEN, F.; DALLERY, Y.: A performance comparison of pull type control mechanisms for multi-stage manufacturing. **International Journal of Production Economics**, vol. 68, pp. 59-71, 2000.

KELTON, W. D.; SADOWSKI, R. P.; SADOWSKI, D. A. **Simulation with Arena**. 4th ed., London: McGraw-Hill, 2007.

KHOJASTEH-GHAMARI, Y. A performance comparison between Kanban and CONWIP controlled assembly systems. **Journal of Intelligent Manufacturing**, 20, pp. 751-760, 2009.

KIM, K.; CHHAJED, D.; PALEKAR, U. S. A comparative study of the performance of push and pull systems in the presence of emergency orders. **International Journal of Production Research**, v. 40, n. 7, p. 1627-1646, 2002.

KIMBALL, G. General principles of inventory control. **Journal of Manufacturing and Operations Management**, v. 1, n.1, 119-130, 1988.

KRAJEWSKI, L. J.; KING, B. E.; RITZMAN, L. P.; WONG, D. S. Kanban, MRP, and shaping the manufacturing environment. **Management Science**, vol. 33, no. 1, pp. 39-57, January 1987.

KRISHNAMURTHY, A. **Analitical Performance Model for Material Control Strategies in Manufacturing Systems**. 2002. 411f. Dissertation (Doctor of Phisolophy – Industrial Engineering), University of Wiskonsin-Madison, 2002.

KRISHNAMURTHY, A.; SURI, R.; VERNON, M. Re-Examining the Performance of MRP and Kanban Material Control Strategies for Multi-Product Flexible Manufacturing Systems. **International Journal of Flexible Manufacturing Systems**. vol. 16, no. 02, pp. 123-150, 2004.

KUMAR, C. S.; PANNEERSELVAM, R. Literature review of JIT-KANBAN system. **Int J Adv Manuf Technol**, v. 32, pp. 393–408, 2007.

LAGE JUNIOR, M.; BONATO, F. K. **Minidicionário de termos, expressões e siglas de planejamento e controle da produção**. Goiânia: FUNAPE/DEPECAC, 2010.

LAGE JUNIOR, M.; GODINHO FILHO, M. Adaptações ao sistema kanban: revisão, classificação, análise e avaliação. **Revista Gestão & Produção**, v.15, n.1, 2008.

LAGE JUNIOR, M.; GODINHO FILHO, M. Proposta de um modelo para avaliação da utilização do sistema *kanban* em empresas industriais. In: Encontro Nacional de Engenharia de Produção, XXIX ENEGEP, 2009, Salvador. **Anais...** Salvador, 2009.

LAMBRECHT, M.R., DECALUWE, L. JIT and Constraint Theory: The Issue of Bottleneck Management. **Production and Inventory Management Journal/ Third Quarter 1988**; vol. 29, n.3, pp 61 -66, 1998.

LAND, M. J. Cobacabana (control of balance by card-based navigation): A card-based system for job shop control. **International Journal Production Economics**, 117, p. 97-103, 2008.

LAUDON, K. C.; LAUDON, J. P. **Sistemas de Informação Gerenciais**. 7 ed. Rio de Janeiro: Pearson Education, 2007.

LAW, A. M.; KELTON, W. D. **Simulation Modeling & Analysis**. 3rd edition, New York: McGraw- Hill, 2000.

LAW, A. M.; McCOMAS, M. G. How to build valid and credible simulation models. **Proceedings...** In: 2001 Winter Simulation Conference, 2001, pp. 22-29.

LEAL, F. **Um diagnóstico do processo de atendimento a clientes em uma agência bancária através de mapeamento do processo e simulação computacional**. 224 f.

Dissertação (mestrado em engenharia de produção) - Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, MG, 2003.

LEAL, F.; ALMEIDA, D. A.; MONTEVECHI, J. A. B. Uma Proposta de Técnica de Modelagem Conceitual para a Simulação através de elementos do IDEF. In: Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, 2008, João Pessoa, PB. **Anais...** XL Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, 2008.

LEAL, F.; OLIVEIRA, M.L.M.; ALMEIDA, D.A.; MONTEVECHI, J.A.B; MARINS, F.A.S.; MATOS, A.J. M. Elaboração de modelos conceituais em simulação computacional através de adaptações na técnica ideo: uma aplicação prática. In: Encontro Nacional de Engenharia de Produção, XXVII ENEGEP, 2007, Foz do Iguaçu, PR. **Anais...** Foz do Iguaçu, 2007.

LEE, L. H.; CHEW, E. P.; TENG, S.; CHEN, Y. Multi-objective simulation-based evolutionary algorithm for aircraft spare parts allocation problem. **European Journal of Operational Research**, No. 189, 2008, pp.476-491.

LEE, Y.-J.; ZIPKIN, P. Tandem queues with planned inventories. **Operations Research**, v.40, n. 5, 936-947, 1992.

LIBEROPOULOS, G.; KOUKOUMIALOS, S. Tradeoffs between base stock levels, number of kanbans, and planned supply lead times in production/inventory systems with advance demand information. **International Journal of Production Economics**, 96, pp. 213-232, 2005.

LOURENÇO, C. **Estatística II: Testes de hipóteses para mais de duas amostras One-Way ANOVA**, 2004. 13 p. Disponível em: <http://estatisticaiscte.no.sapo.pt/08_estes_hipotese_ANOVA.pdf>. Acesso em: 23 dez. 2012.

MACDONALD, C.; GUNN, E.A. A simulation based system for analysis and design of manufacturing production control systems. **Proceedings...** Winter Simulation Conference, pp. 1882-1890, 2008.

MAREK, R. P.; ELKINS, D. A.; SMITH, D. R. Understanding the fundamentals of kanban and CONWIP pull systems using simulation. **Proceedings...** 2001 Winter Simulation Conference, pp. 921-929, 2001.

MATALLO JR., H. A problemática do conhecimento. In: CARVALHO, M. C. M. de (org.). **Construindo o saber**. 2.ed. Campinas, SP: Papirus. pp.13-28. 2000.

MILTENBURG, J.: Comparing JIT, MRP and TOC, and embedding TOC into MRP. **International Journal of Production Research**, v.35, no 4, pp.1147-1169, 1997.

MONDEN, Y. Adaptable Kanban System Helps Toyota Maintain Just-In-Time Production, *Industrial Eng.*, Vol. 13(5), pp. 28-46, May 1981.

MOREIRA, D. A. **Administração da Produção e Operações**. 2. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2008.

MOURA JUNIOR, A. N. C. **Novas tecnologias e sistemas de administração da produção - análise do grau de integração e informatização nas empresas catarinenses**. 1996.

Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Santa Catarina. 1996. Disponível em: <<http://www.eps.ufsc.br/disserta96/armando/index/index.htm#sumario>>. Acesso em: 31 dez. 2010.

MUCKSTADT, J. A.; TAYUR, S. R. A comparison of alternative *Kanban* control mechanisms. I. Background and structural results. **IEEE Transactions**, vol. 27, pp. 151-1161, 1995 PANDEY, P.C., AND KHOKHAJAIKIAT, P. Performance modeling of multistage production systems operating under hybrid push/pull control. **International Journal of Production Economics**, vol 43, pp. 17-28, 1996.

NAZARENO, R. R. **Desenvolvimento de sistemas híbridos de planejamento e programação da produção com foco na implantação de manufatura enxuta**. 2008. 317 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. 2008.

NUNES, A. F.; RANGEL, J. J. A. Uma proposta de documentação para modelos conceituais de simulação IDEF-SIM. In: Encontro Nacional de Engenharia de Produção. XXIX ENEGEP, 2009, Salvador, BA. **Anais...** Salvador, BA, 2009.

ORLICKY, J. **Material requirements planning: the new way of life in production and inventory management**. New York: McGraw-Hill, 1975.

OVALLE, A. O. R.; MARQUEZ, B. A. C. Exploring the utilization of a CONWIP system for supply chain management. A comparison with fully integrated supply chains. **Int. J. Production Economics**, 83, p. 195-215, 2003.

PARAGON. **Cases**. Disponível em: <http://www.paragon.com.br/padrao.aspx?cases_por_cliente_content_lst_2060__.aspx>. Acesso em: 09 out. 2011.

PATERNINA-ARBOLEDA, C. D.; DAS, T. K. Intelligent dynamic control policies for serial production lines. **IIE Transactions**, vol. 33, pp. 65-77, 2001.

PEDGEN, C. D.; SHANNON, R. E.; SADOWSKI, R. P. **Introduction to simulation using siman**. New York, USA, McGraw Hill, 1990. 615 p.

PIDD, M. **Computer Simulation in Management Science**, 3rd ed. New York: John Wiley & Sons, 1995.

PINTO, C. R. M. **Aplicação de metodologias de administração da produção em um fabricante de cabos elétricos**. 2006. 105 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas. 2006.

PIRES, S. R. I. **Gestão estratégica da produção**. Piracicaba: UNIMEP, 1995. 270 p.

PLOSSL, G. W. **Production and inventory control - principles and techniques**. 2. ed. Englewood Cliffs, N. J.: Prentice-Hall, Inc., 1985. 443p.

PRADO, D. **Usando o Arena em Simulação**. Belo Horizonte: INDG, 2004.

RAMSAY, M. L; BROWN, S.; TABIBZADEH, K. Push, pull and squeeze shop floor control with computer simulation. **Industrial Engineering**, 22, pp. 39-45, 1990.

ROCKWELL AUTOMATION. **OptQuest for Arena: User's Guide**. Rockwell Automation Technologies: ARENAO-UM001D-EN-P, 2006.

RUSSOMANO, V. H. **PCP: planejamento e controle da produção**. São Paulo: Pioneira, 1995. 320p.

SAMARATUNGA, C.; SETHI, S. P.; ZHOU, X. Y. Computational evaluation of hierarchical production control policies for stochastic manufacturing systems. **Operations Research**, vol. 45, no. 2, pp. 258-274, march-april 1997.

SANTORO, C. M.; FREIRE G. Análise Comparativa entre Modelos de Estoque. **Revista Produção**, v. 18, n. 1, p. 89- 98, Jan./Abr. 2008.

SARGENT, R. G. Verification and Validation of Simulation Models. **Proceedings...** In: 1994 Winter Simulation Conference, 1994, pp. 77-87.

SARGENT, R. G. Verification and validation of simulation models. **Proceedings...** In: Winter Simulation Conference, Austin, TX, USA, 2009. pp. 157-169.

SARKER, B. R., FITZSIMMONS, J. A. The performance of push and pull systems: a simulation and comparative study. **International Journal of Production Research**, vol. 27, n. 10, pp. 1715–1731, 1989.

SCHEFFÉ, H. A method for judging all contrasts in the analysis of variance. **Biometrika**, vol. 40, no. 1/2, pp. 87-104, 1953.

SCHMIDT, R. Application of Simulation for Order Sequencing in Flow-Shop Production Systems. **Record of Proceedings - Annual Simulation Symposium**, 1988, p 71-89.

SCRIBER, T. J. **An Introduction to Simulation Using GPSS/H**. USA, John Wiley & Sons, 1991. 437 p.

SEGERSTEDT, A. Formulas of MRP. **Int. J. Production Economics**, 46-47, pp. 127-136, 1996.

SELVARAJ, N. The optimization of number of kanbans in GKCS with simulation technique. **ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences**. v. 4, n. 5, pp. 44- 52, July, 2009.

SHANNON, R. E. **Systems simulation: the art and science**. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1975.

SHARADAPRIYADARSHINI, R. C. Scheduling in kanban-controlled flow shop with dual blocking mechanisms and missing operations for part types. **International Journal of Production Research**, v. 35, n. 11, pp. 3133–3156, 1997.

SILVA, L. B. G. **Utilização de Simulação e Análise de Superfície de Resposta Fuzzy na Minimização de Recursos em Projetos Não Repetitivos**. 2009. 65 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais. 2009.

SILVER, E. A. & PETERSON, R. **Decision systems for inventory management and production planning**. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1985. 722p.

SIPPER, D.; BULFIN JR., R. L. **Production: planning, control, and integration**. New York: McGraw-Hill, 1997. 630 p.

SLACK, N.; CHAMBERS, S.; HARLAND, C.; HARRISON, A.; JOHNSTON, R. **Administração da Produção**. São Paulo: Atlas, 2002. 747 p.

SMET, R. D.; GELDERS, L. Using simulation to evaluate the introduction of a Kanban subsystem within an MRP-controlled manufacturing environment. **International Journal Production Economics**, n.56-57, pp.111-122, 1998.

SOUZA, M. O. **Análise da cadeia de suprimento de um combustível especial através da simulação computacional**. 2008. 174 f. Dissertação. (Mestrado em Ciências em Engenharia de Produção) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2008.

SPEARMAN, M. L. WOODRUFF, D. HOPP, W. J. CONWIP: a pull alternative to kanban. **International Journal of Production Research**, v. 28, n. 5, pp. 879-894, 1990.

SPEARMAN, M. L.; KANZANIS, M. A. Push and pull production systems: issues and comparison. **Operations Research**, v. 40, pp. 521-532, 1992.

STAIR, R. M.; REYNOLDS, G. W. **Princípios de Sistemas de Informação**. 6ª Edição, São Paulo: Pioneira Thomson Learning, 2006.

STEELE, D. C.; PHILIPOOM, P. R.; MALHOTRA, M. K.; FRY, T. D. Comparisons between drum-buffer-rope and material requirements planning: a case study. **International Journal of Production Research**, vol. 43, n. 15, pp. 3181-3208, 2005.

STEINER, G. A. **Strategic planning**. New York: Free Press., 1979.

TAKAHASHI, K. Comparing reactive *Kanban* systems. **International Journal of Production Research**, vol. 41, n. 18, pp. 4317-4337, 2003.

TAKAHASHI, K.; NAKAMURA, N. Comparing reactive Kanban and reactive CONWIP. **Production Planning & Control**, vol. 13, no. 8, pp. 702-714, 2002.

TAKAHASHI, K.; NAKAMURA, N. Ordering alternatives in JIT production systems. **Production Planning & Control**, vol. 9, n. 8, pp. 784-794, 1998.

THINKBUZAN. **About ThinkBuzan**. Disponível em: <<http://www.thinkbuzan.com/intl/company/about>>. Acesso em: 30 dez. 2012.

TUBINO, D. F. **Planejamento e controle da produção: teoria e prática**. São Paulo: Atlas, 2007.

TUBINO, D. F. **Sistema de produção: a produtividade no chão-de-fábrica**. Porto Alegre: Bookman, 1999.

VAN RYZIN, G., LOU, S. X. C.; GERSHWIN, S. B. Production control for a tandem two-machine system. **IIE Transactions**, v. 25, n.5, pp. 5-20, 1993.

VEATCH, M. H.; WEIN, L. M. Optimal control of a two-station tandem production/inventory system. **Operations Research**, vol. 42, no. 2, 337- 350, March-April 1994.

VOLLMANN, T. E.; BERRY, W. L.; WHYBARK, D. C.; JACOBS, F. R. **Sistemas de planejamento e controle da produção para o gerenciamento da cadeia de suprimentos**. 5ª Ed. Porto Alegre: Bookman, 2006. 648 p.

VOSS, C.; TSIKRIKTSIS, N.; FROHLICH, M. Case research in operations management. **International Journal of Operations & Production Management**, v.22, n.2, pp.195-219, 2002.

WALPOLE, R. E.; MYERS, R. H.; MYERS, S. L.; YE, K. **Probabilidade & Estatística para engenharia e ciências**. 8ª ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2009.

WANG, Y.; CAO, J.; KONG, L. Hybrid Kanban/Conwip Control System Simulation and Optimization Based on Theory of Constraints. **Proceedings...** IEEE International Conference on Intelligent Computing and Intelligent Systems, ICIS 2009, v. 2, pp. 666-670, 2009.

YANG, K. K. Managing a flow line with Single-Kanban, Dual-Kanban or CONWIP. **Production and Operations Management**, vol. 9, n. 4, pp. 349-366, Winter 2000.

YI, Q. **Optimal Production / Inventory Control for a two-machine make-to-stock system**. 2007. 50 p. Dissertation (Master of Science in Manufacturing Systems and Technology) – Nanyang Technological University. 2007.

YIN, R.K. **Case study research: design and methods**. Newbury Park, California: Sage Publications, 1990. 166p.

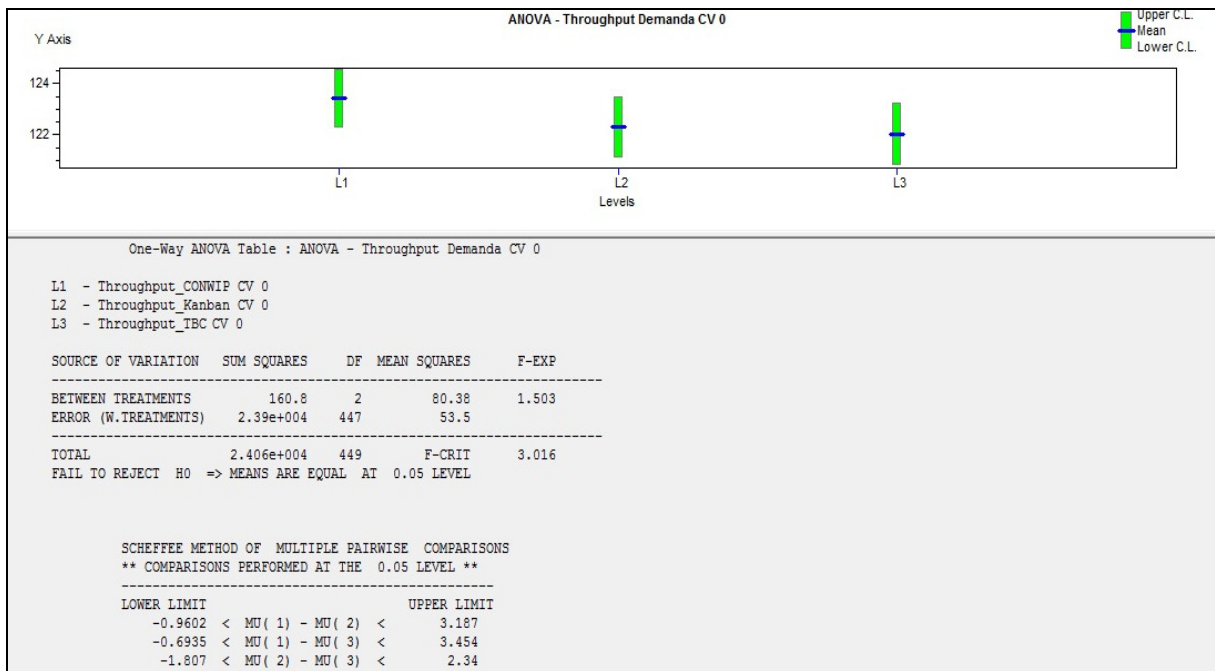
ZACARELLI, S. B. **Programação e controle da Produção**. 5 ed. São Paulo: Livraria Pioneira, 1979. 292p.

ZIPKIN, P. **A kanban-like production control system: analysis of simple models**. Research Working Paper No. 89-91, Graduate School of Business, Columbia University, New York, NY 10027, 1989.

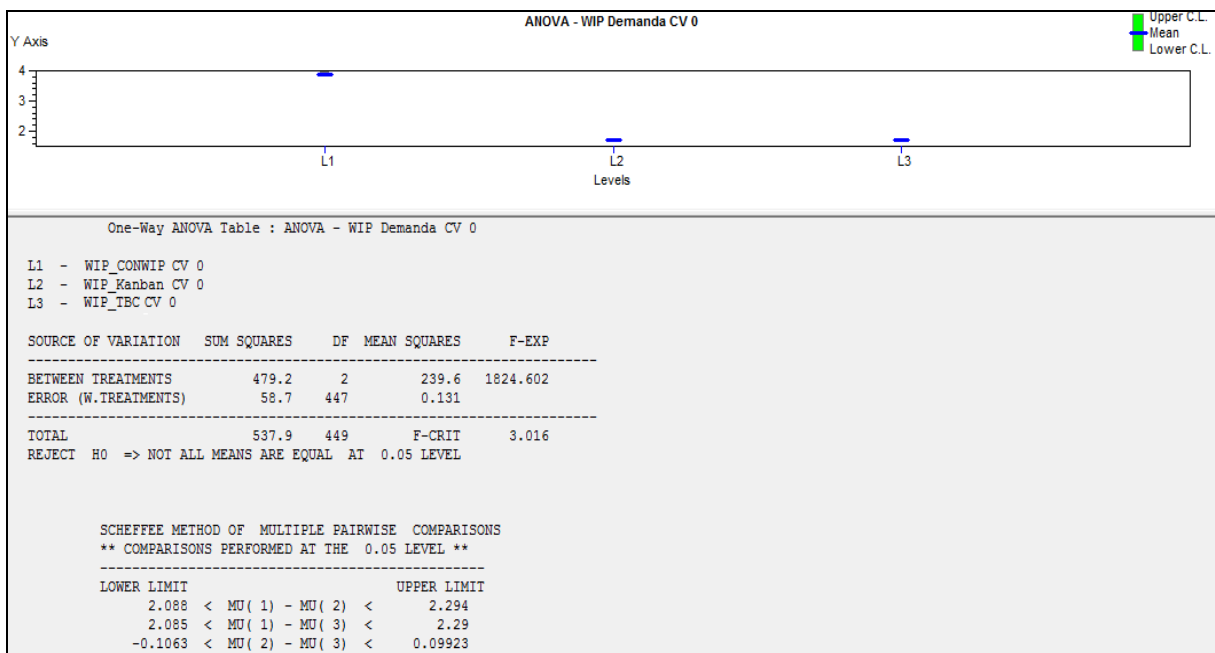
ZIPKIN, P. Processing networks with planned inventories: Tandem queues with feedback. **European Journal of Operational Research**, 80, pp. 344-349, 1995.

APÊNDICE A – ANOVA E MÉTODO DE COMPARAÇÕES MÚLTIPLAS DE SCHEFFÉ

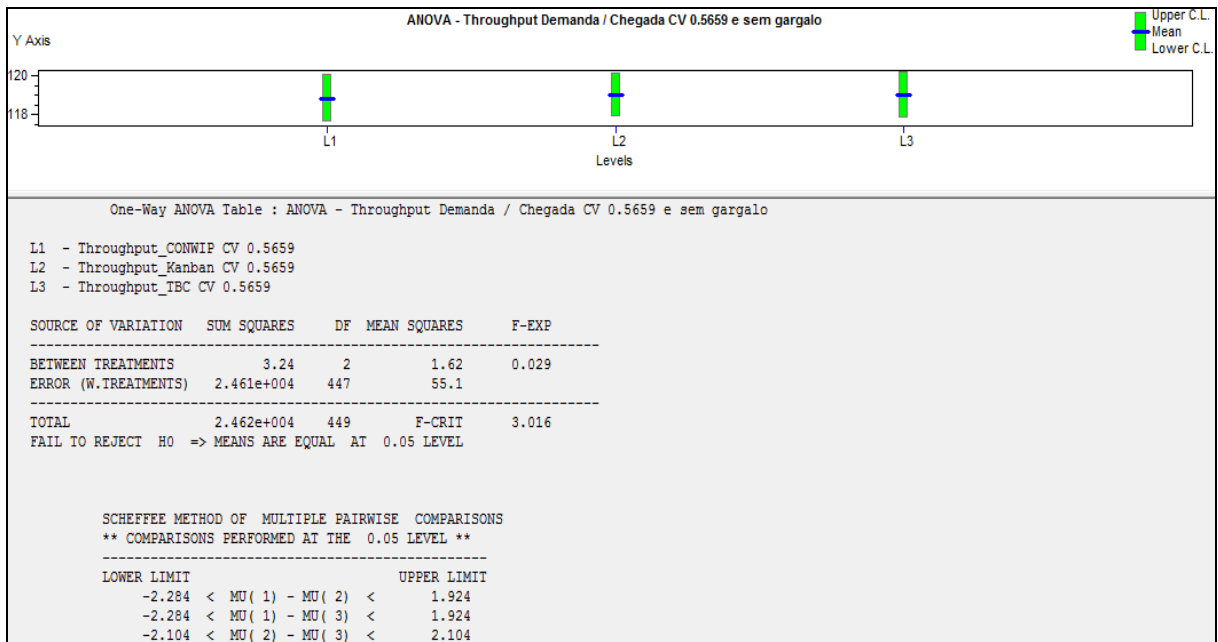
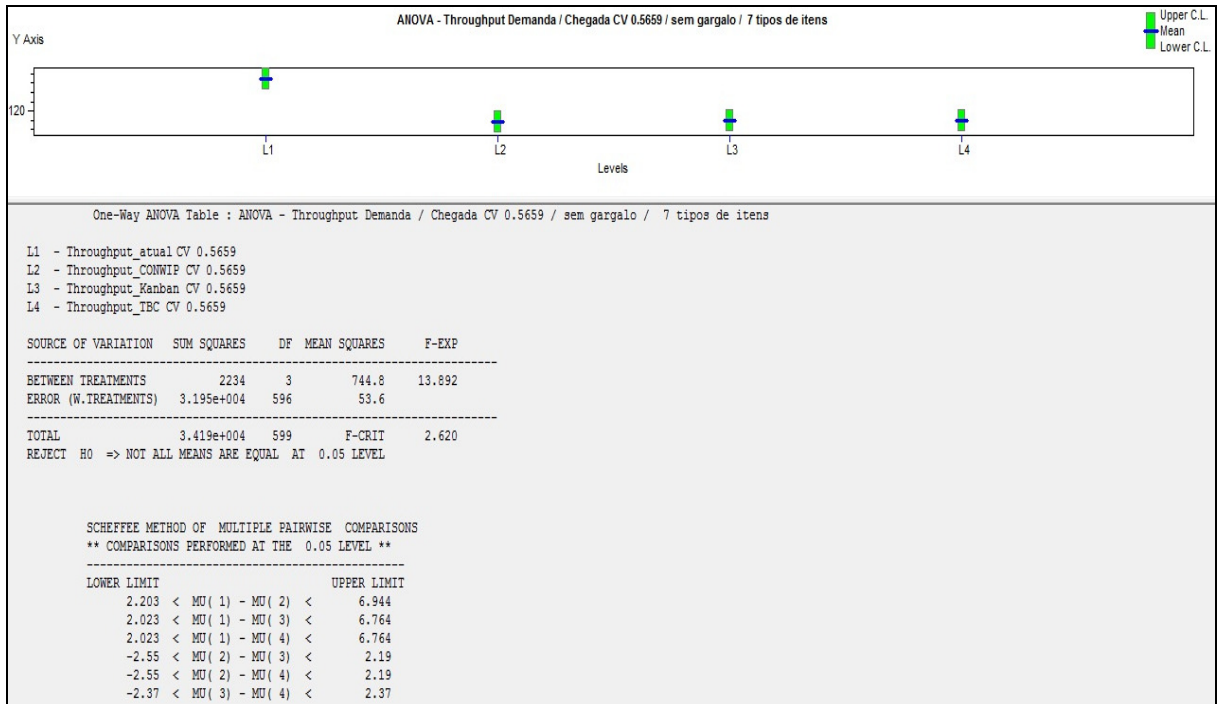
ANOVA para *throughput* do cenário de demanda com CV 0



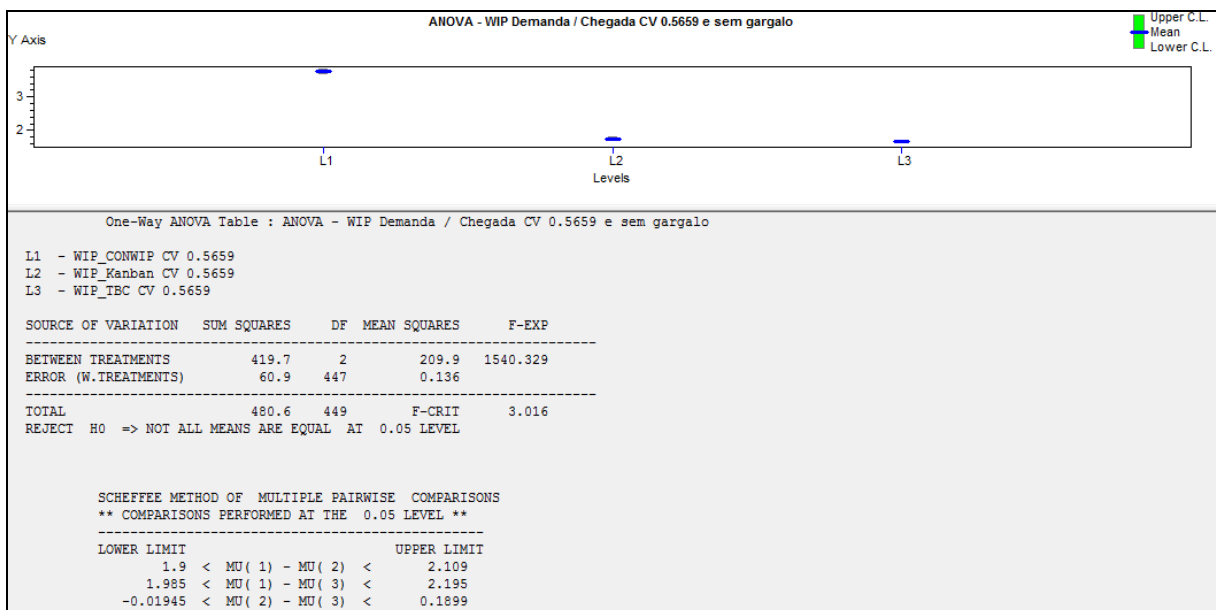
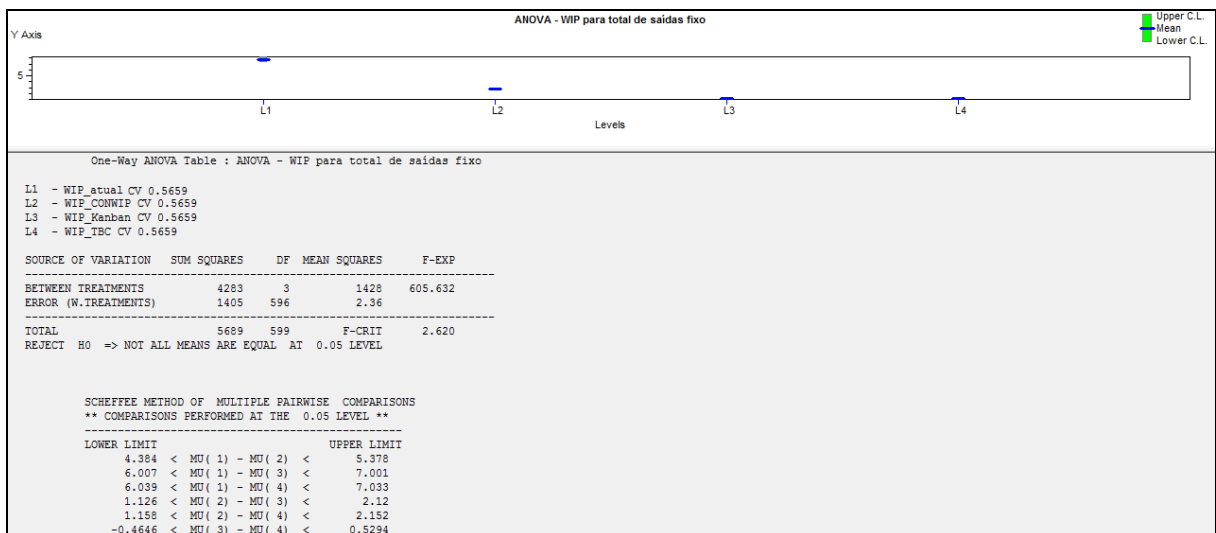
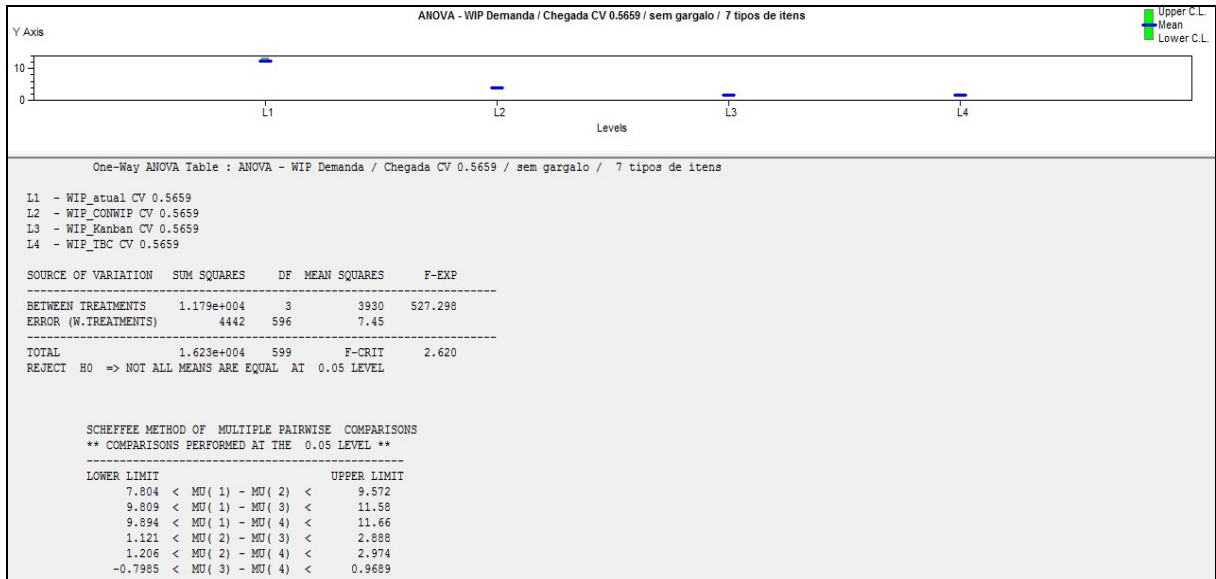
ANOVA para *WIP* do cenário de demanda com CV 0



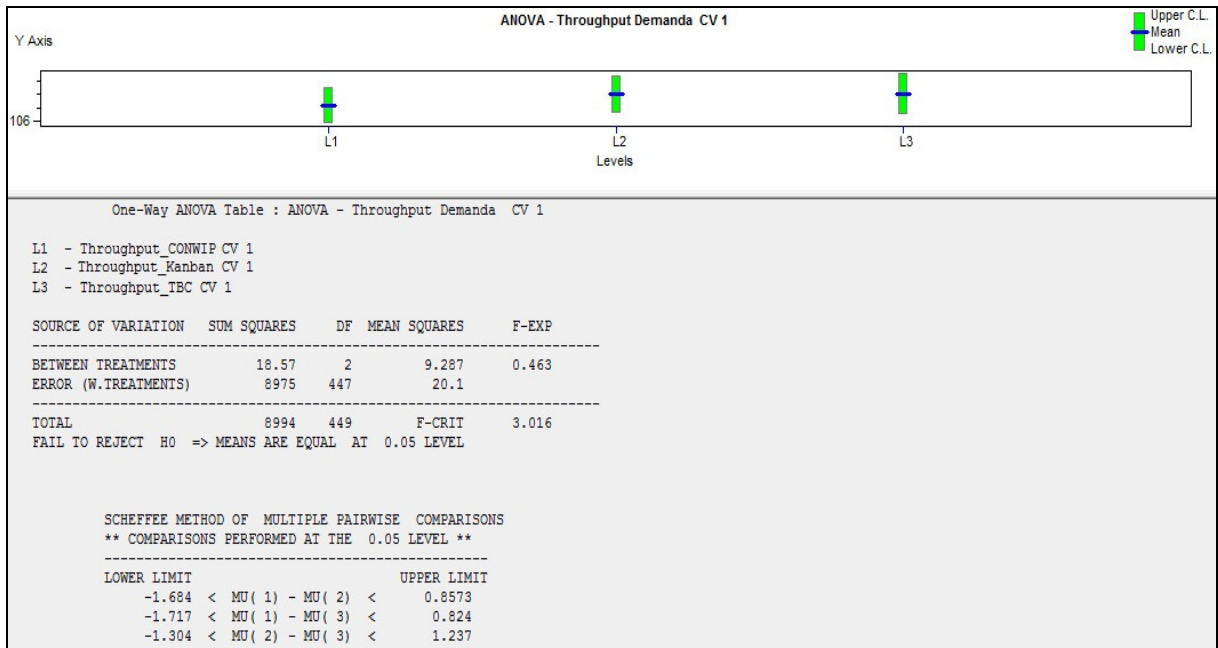
ANOVA para *throughput* dos cenários de demanda/chegada com CV 0,5659, sem gargalo e 7 tipos de itens



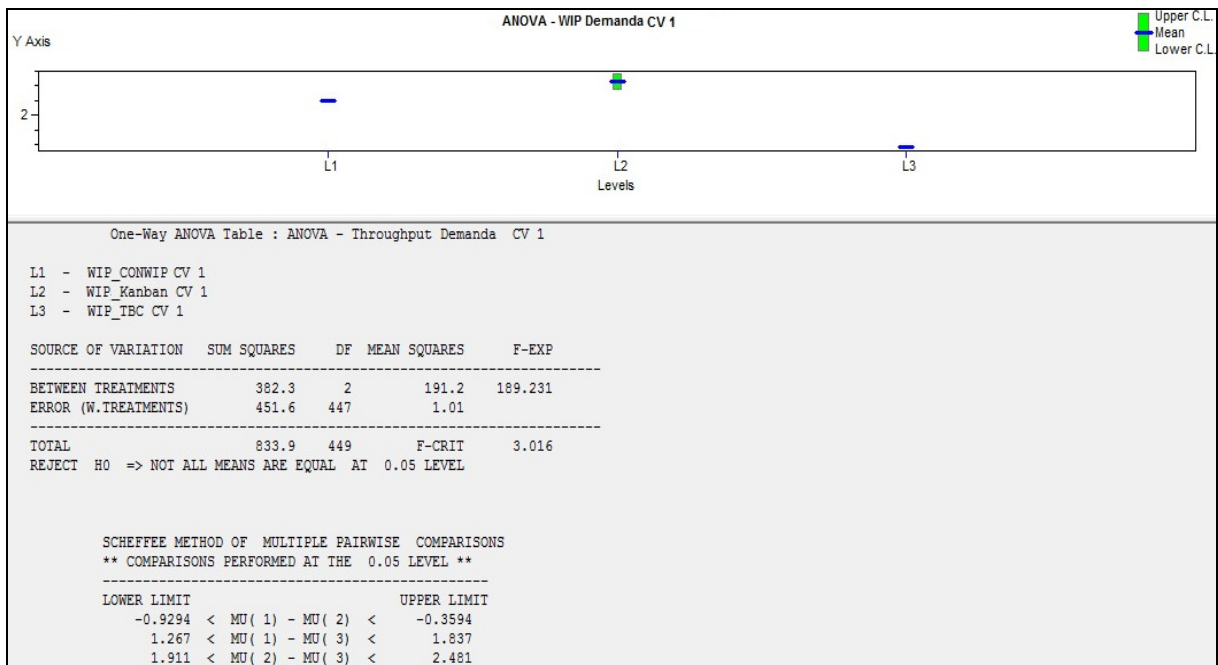
ANOVA para WIP dos cenários de demanda/chegada com CV 0,5659, sem gargalo e 7 tipos de itens



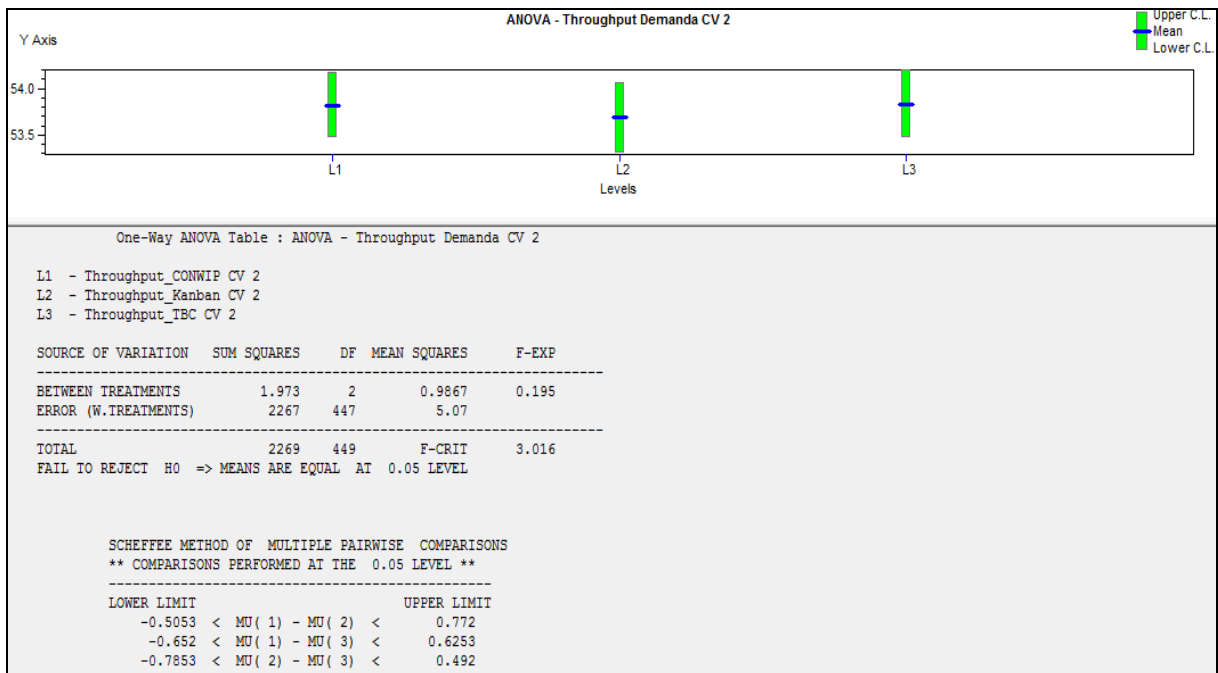
ANOVA para *throughput* do cenário de demanda com CV 1



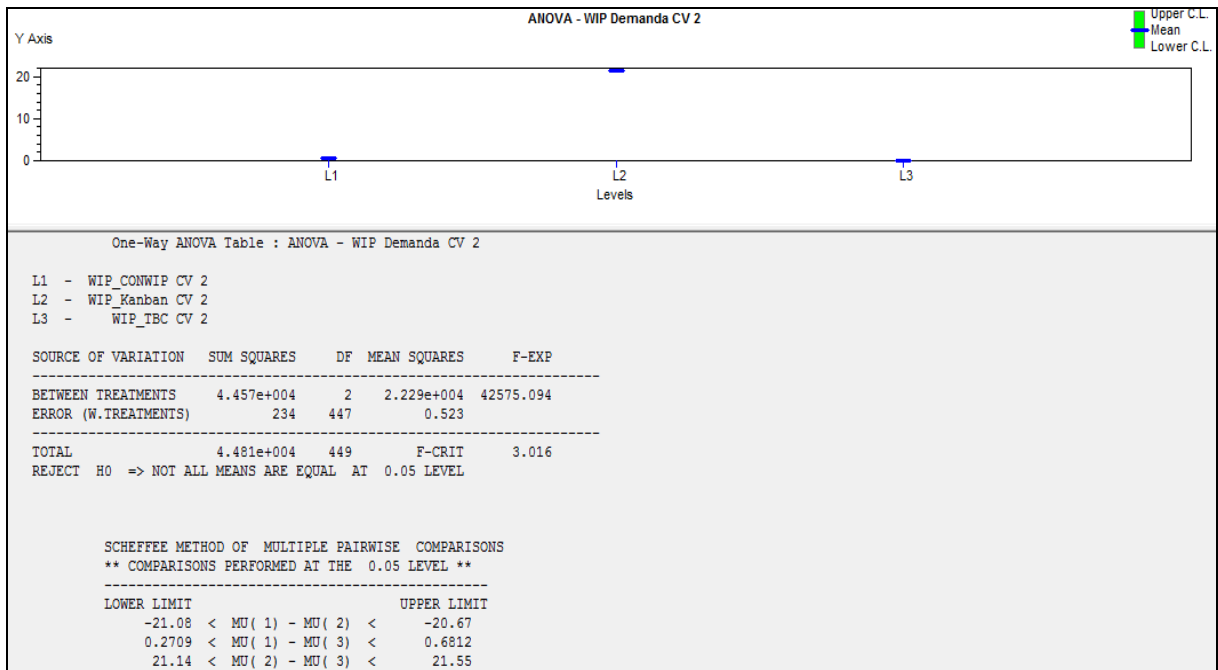
ANOVA para WIP do cenário de demanda com CV 1



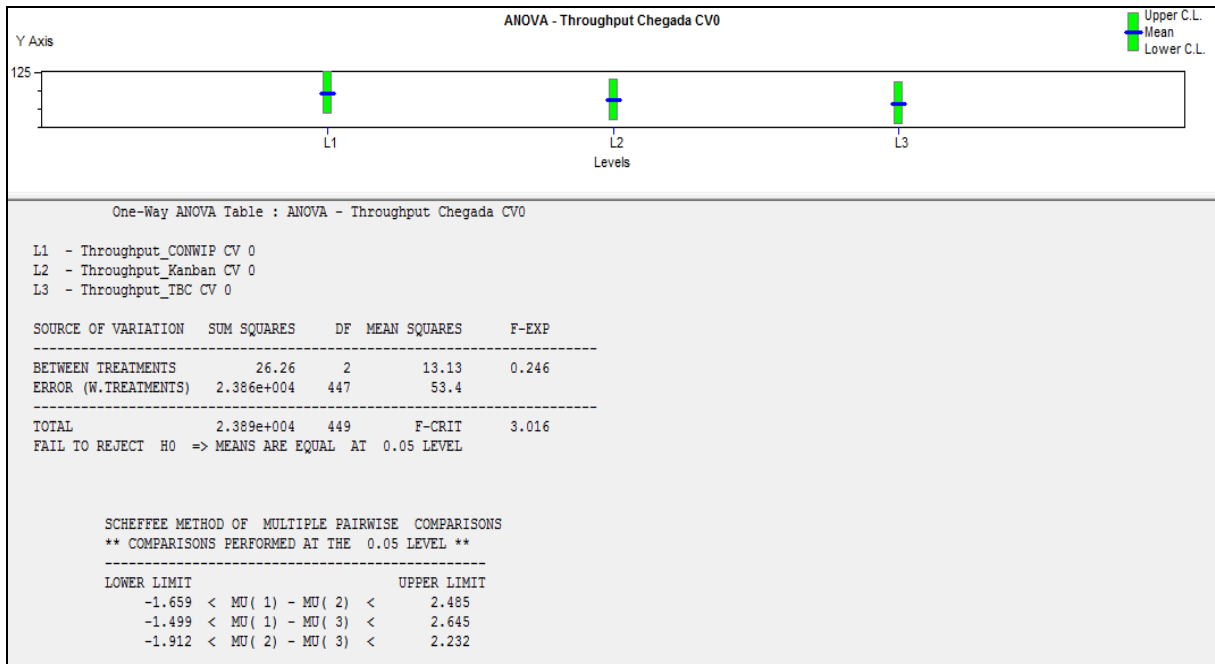
ANOVA para *throughput* do cenário de demanda com CV 2



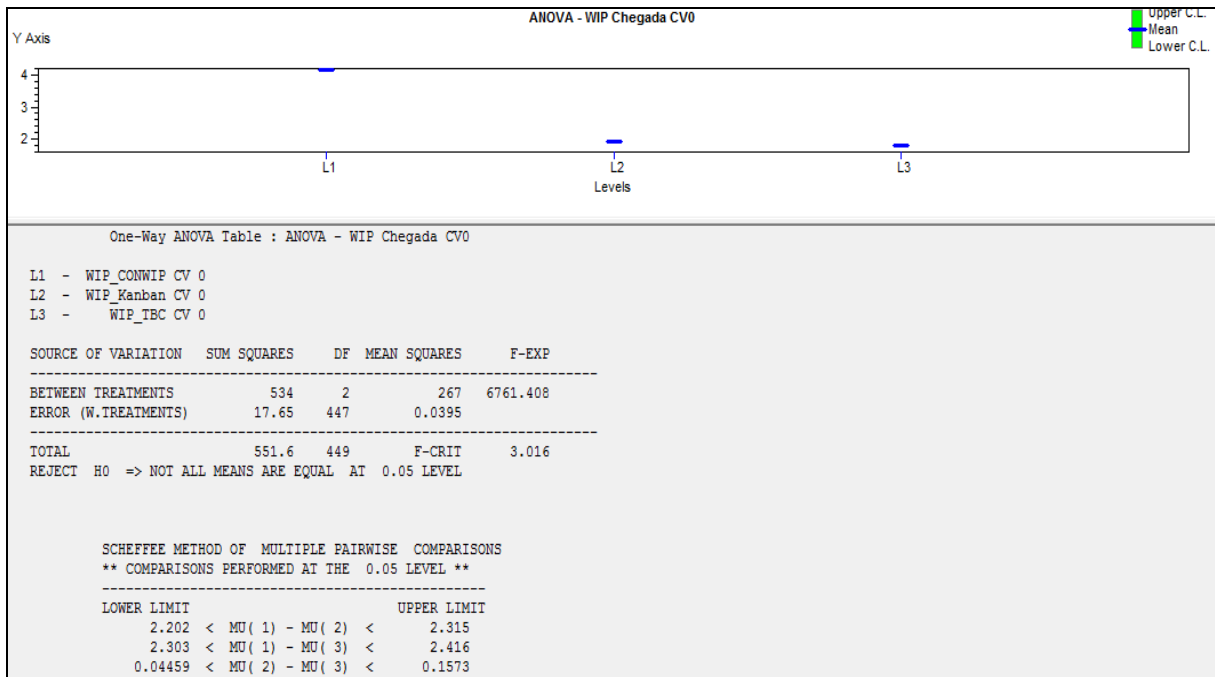
ANOVA para WIP do cenário de demanda com CV 2



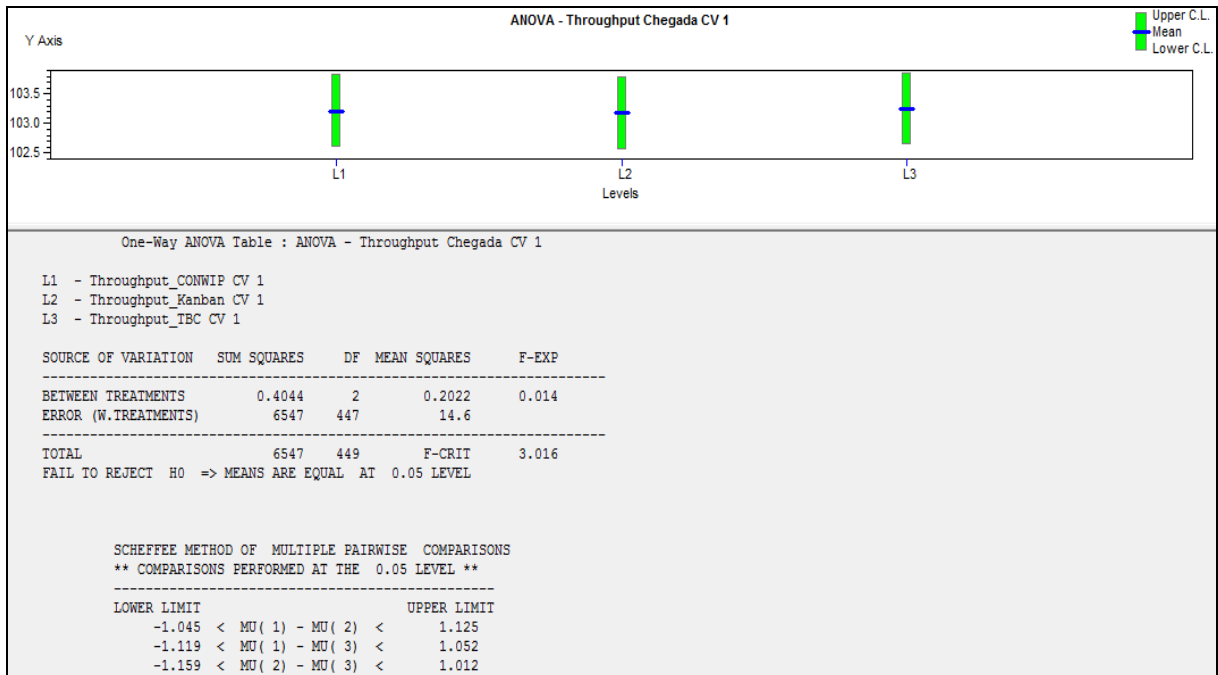
ANOVA para *throughput* do cenário de chegada com CV 0



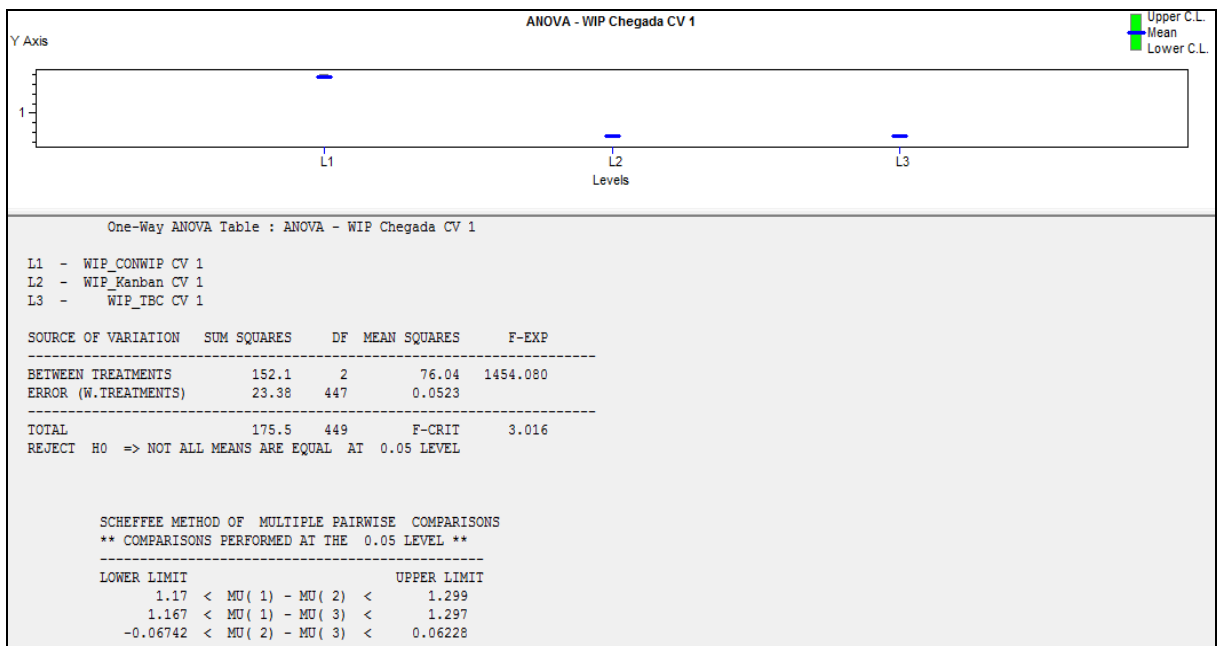
ANOVA para *WIP* do cenário de chegada com CV 0



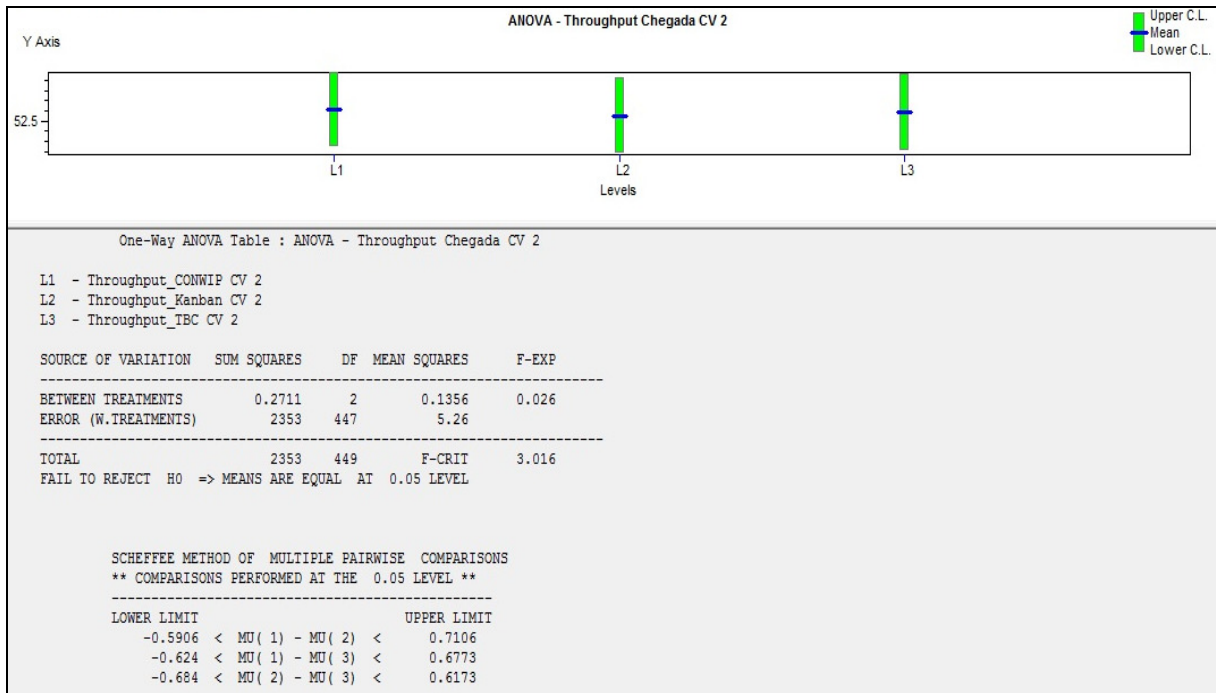
ANOVA para *throughput* do cenário de chegada com CV 1



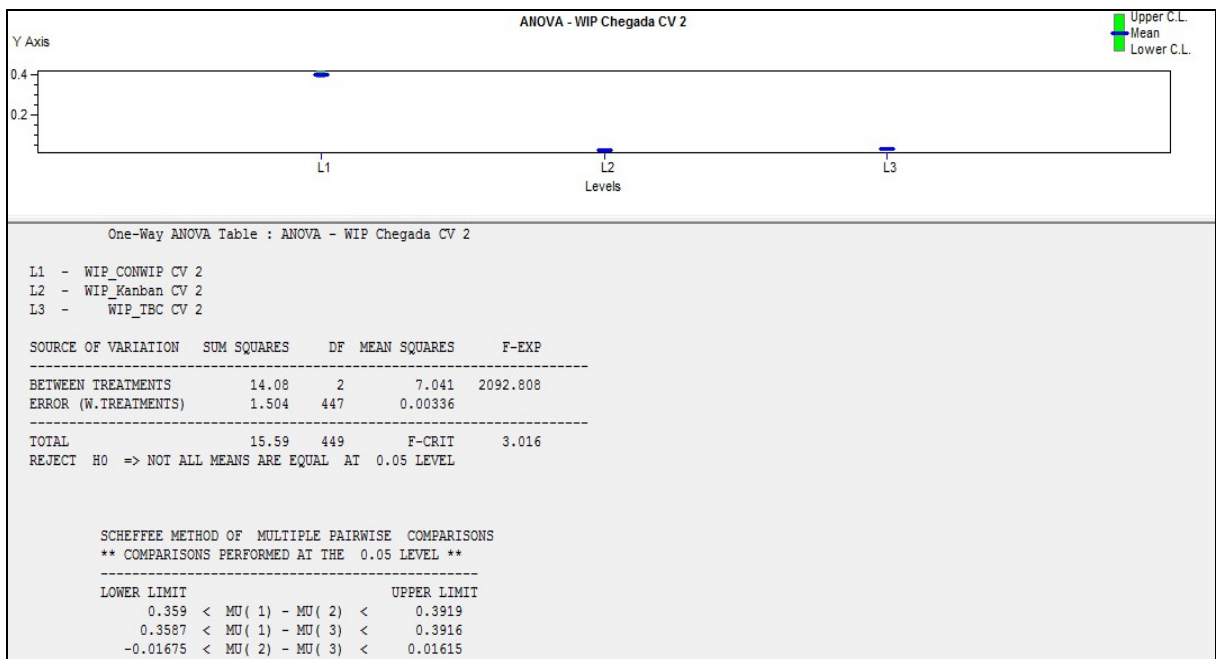
ANOVA para WIP do cenário de chegada com CV 1



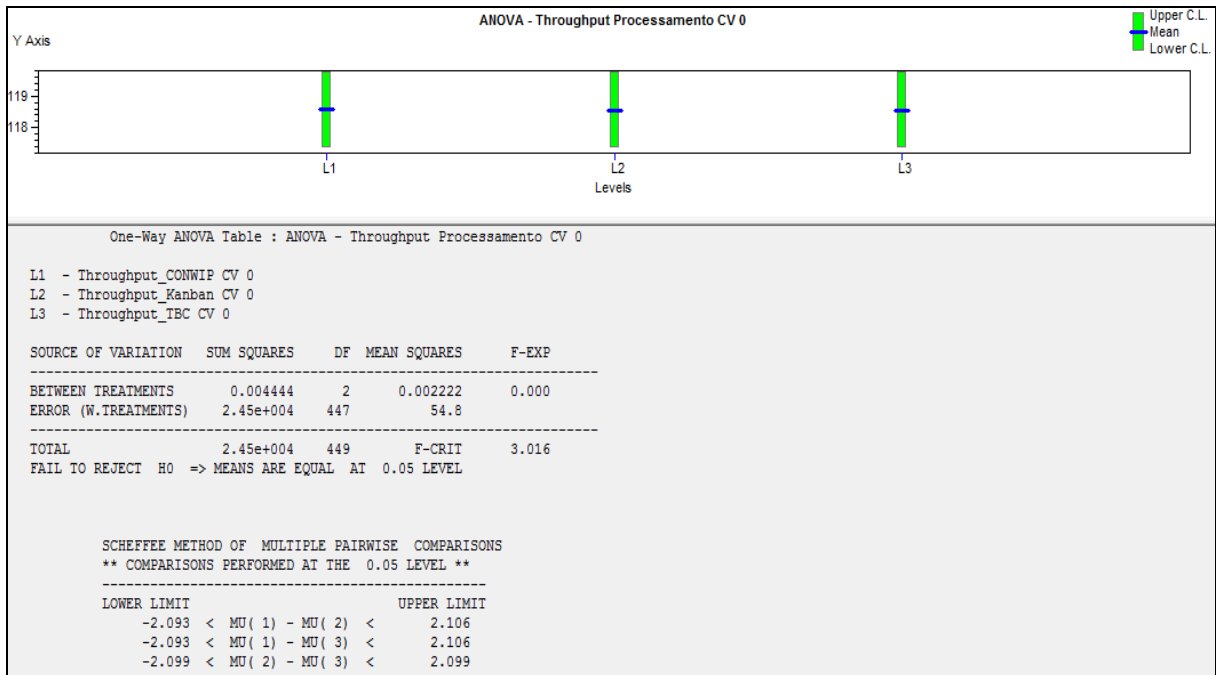
ANOVA para *throughput* do cenário de chegada com CV 2



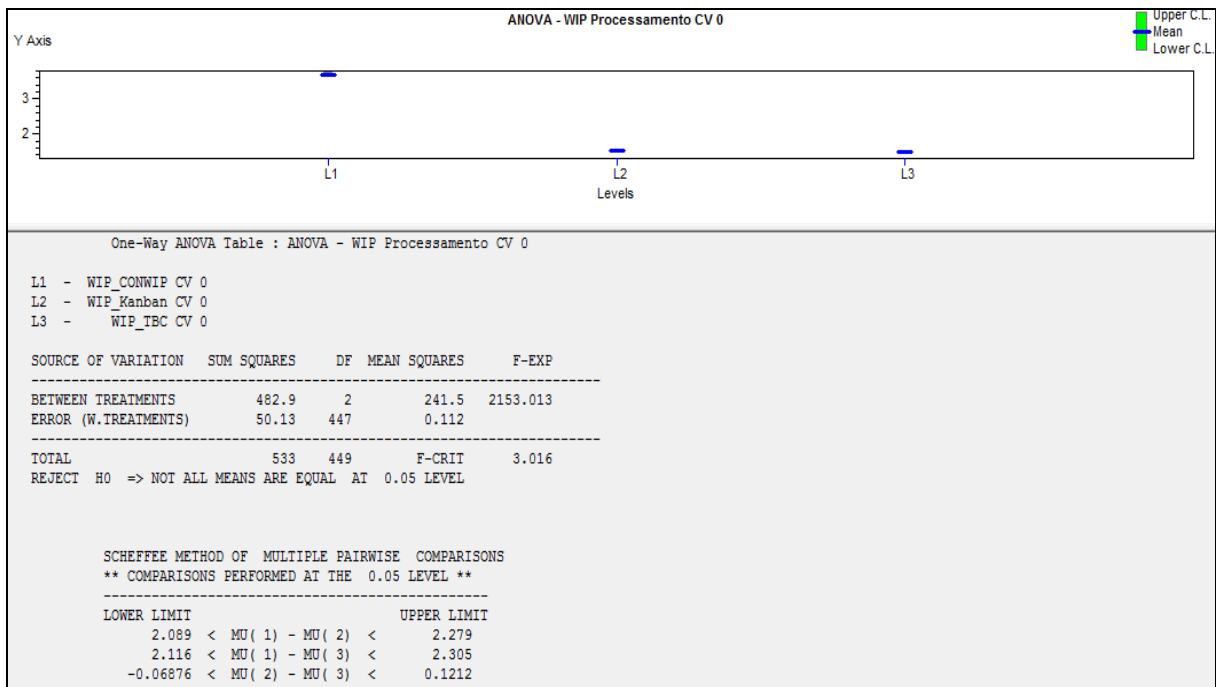
ANOVA para WIP do cenário de chegada com CV 2



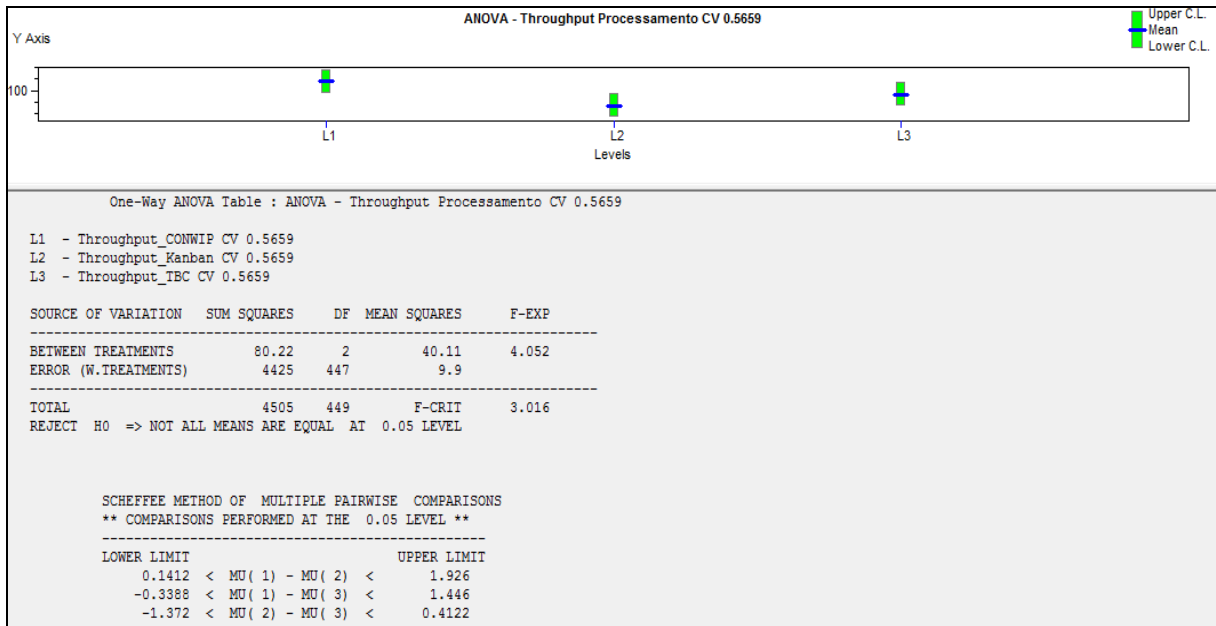
ANOVA para *throughput* do cenário de tempo de processamento com CV 0



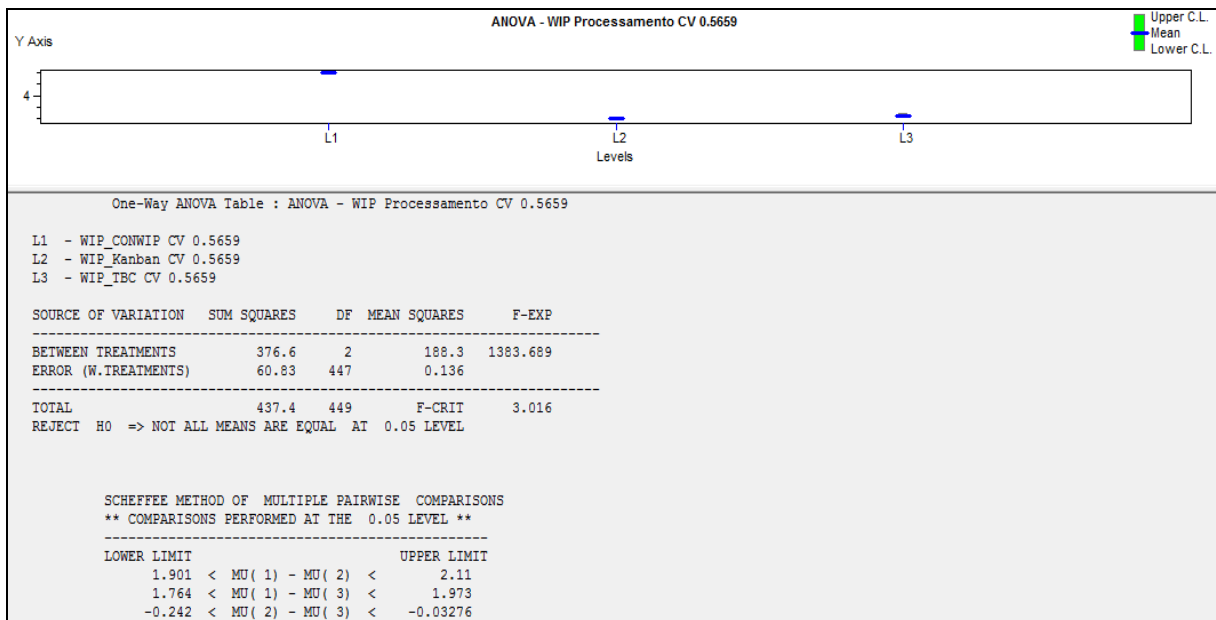
ANOVA para WIP do cenário de tempo de processamento com CV 0



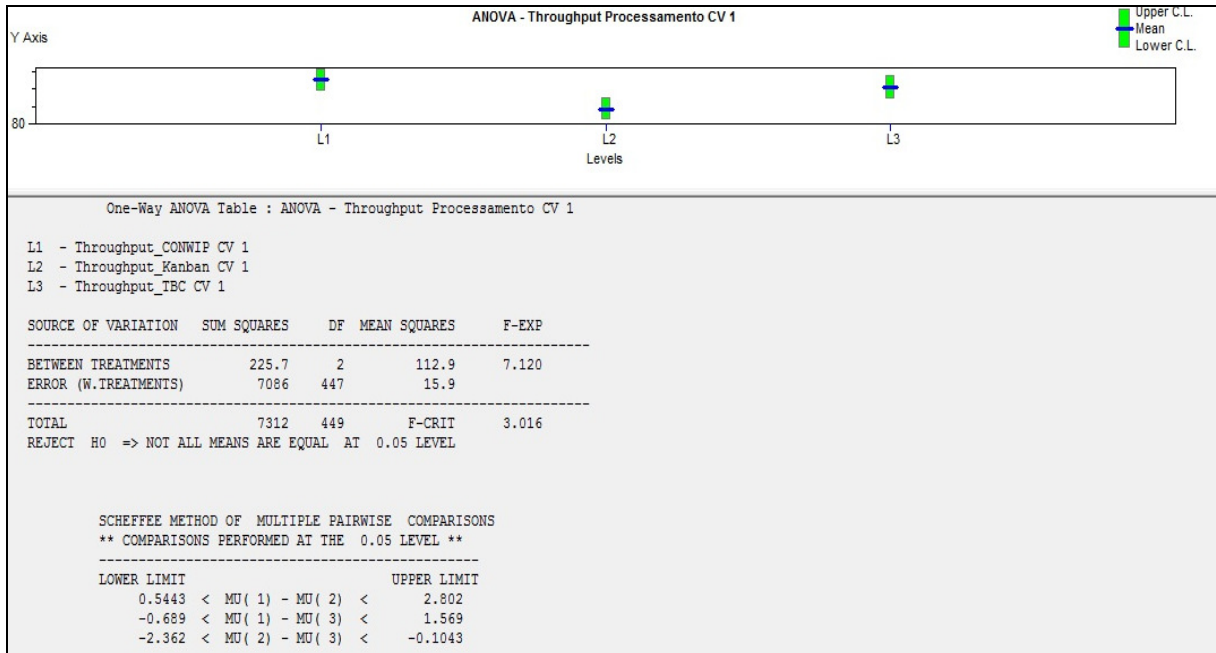
ANOVA para *throughput* do cenário de tempo de processamento com CV 0,5659



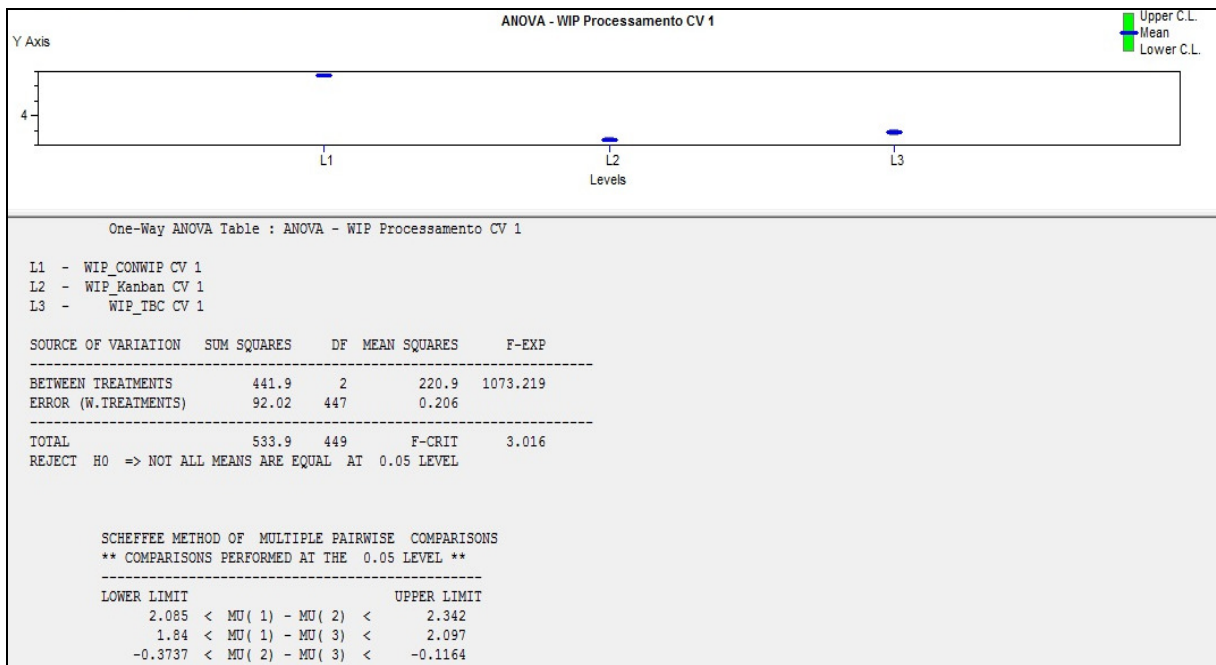
ANOVA para WIP do cenário de tempo de processamento com CV 0,5659



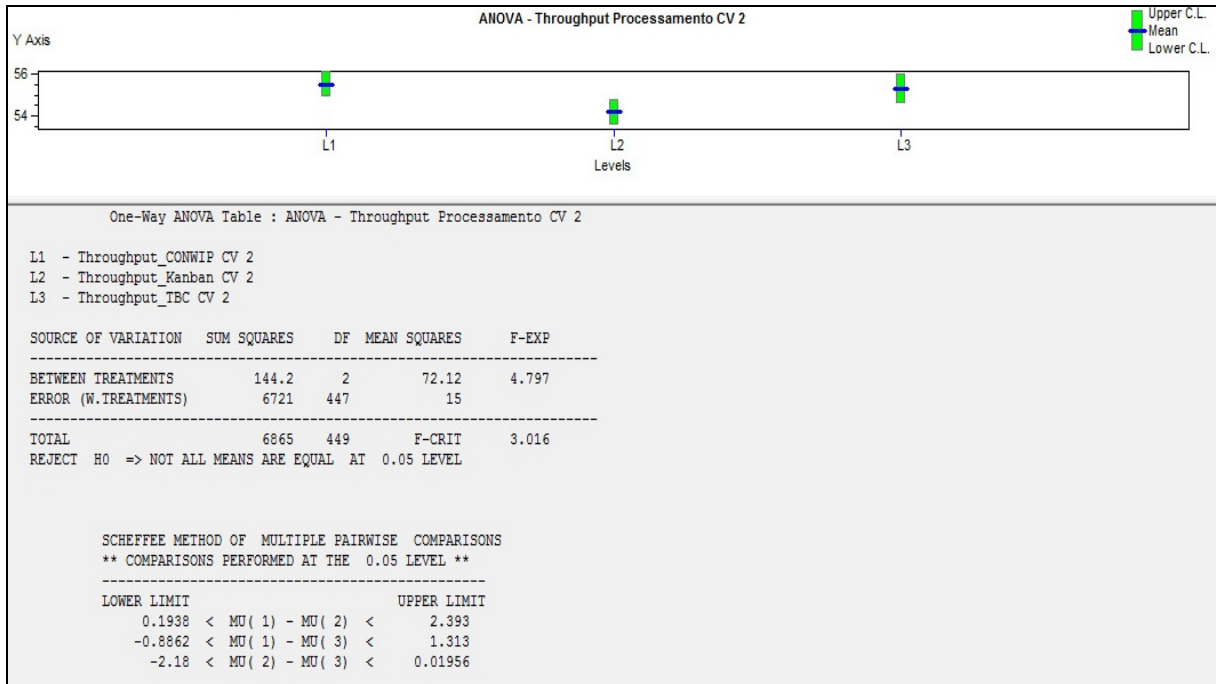
ANOVA para *throughput* do cenário de tempo de processamento com CV 1



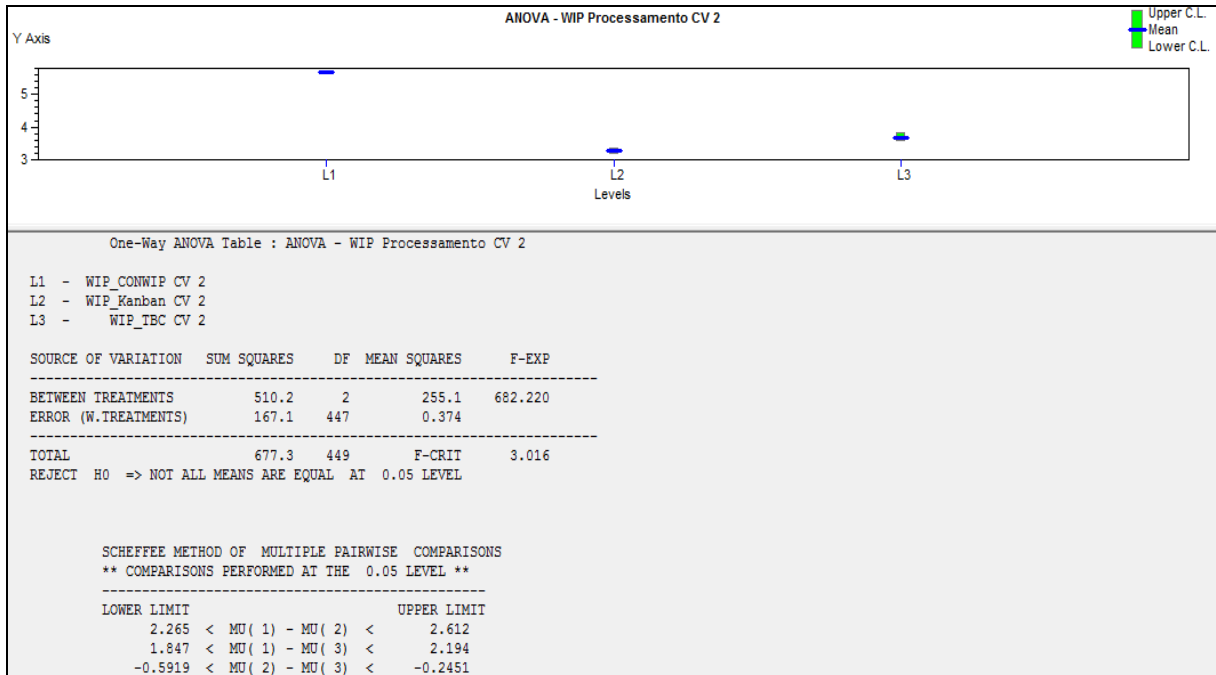
ANOVA para WIP do cenário de tempo de processamento com CV 1



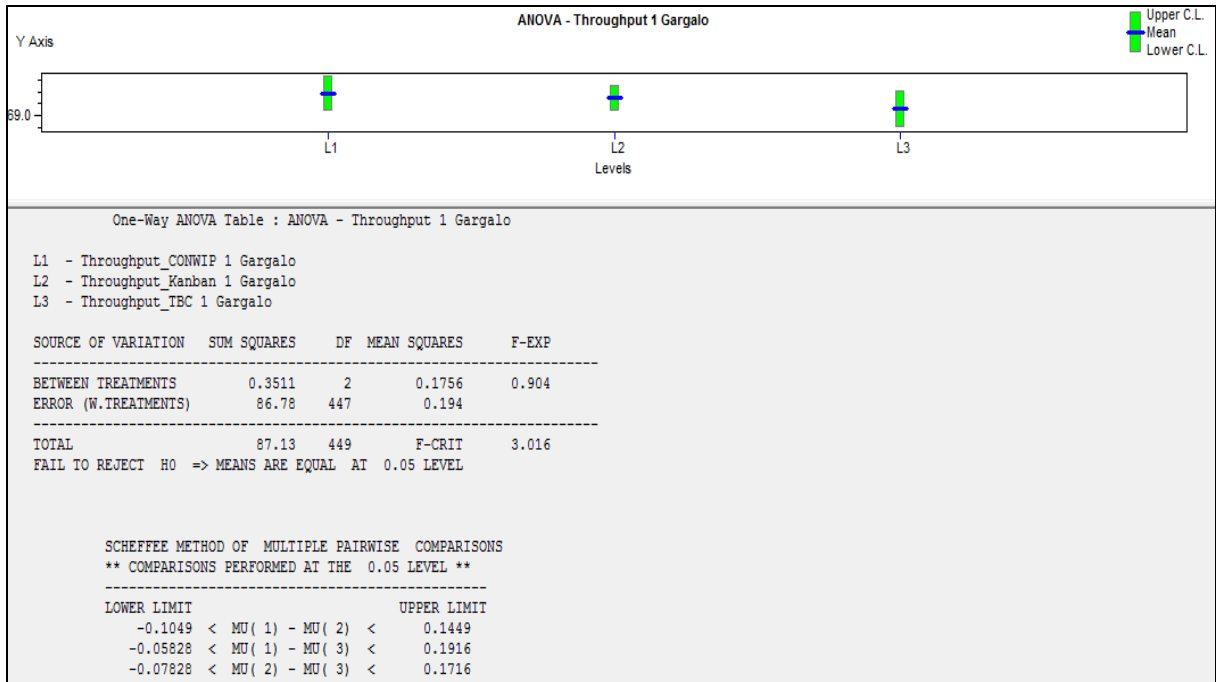
ANOVA para *throughput* do cenário de tempo de processamento com CV 2



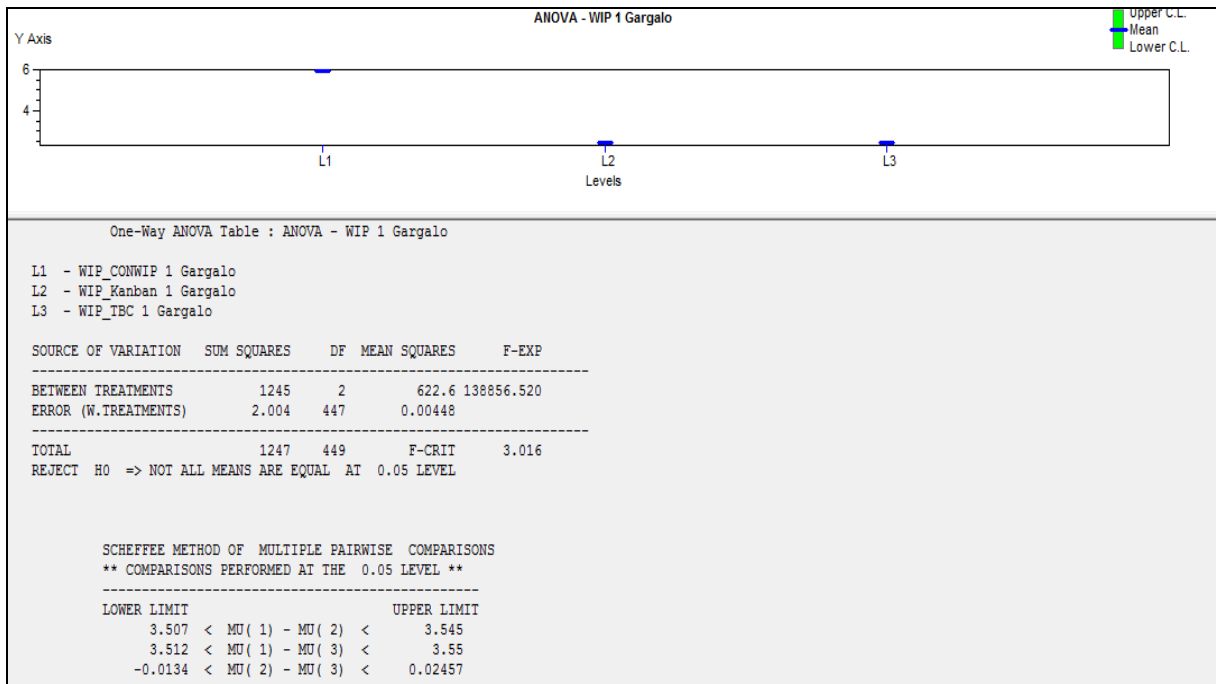
ANOVA para WIP do cenário de tempo de processamento com CV 2



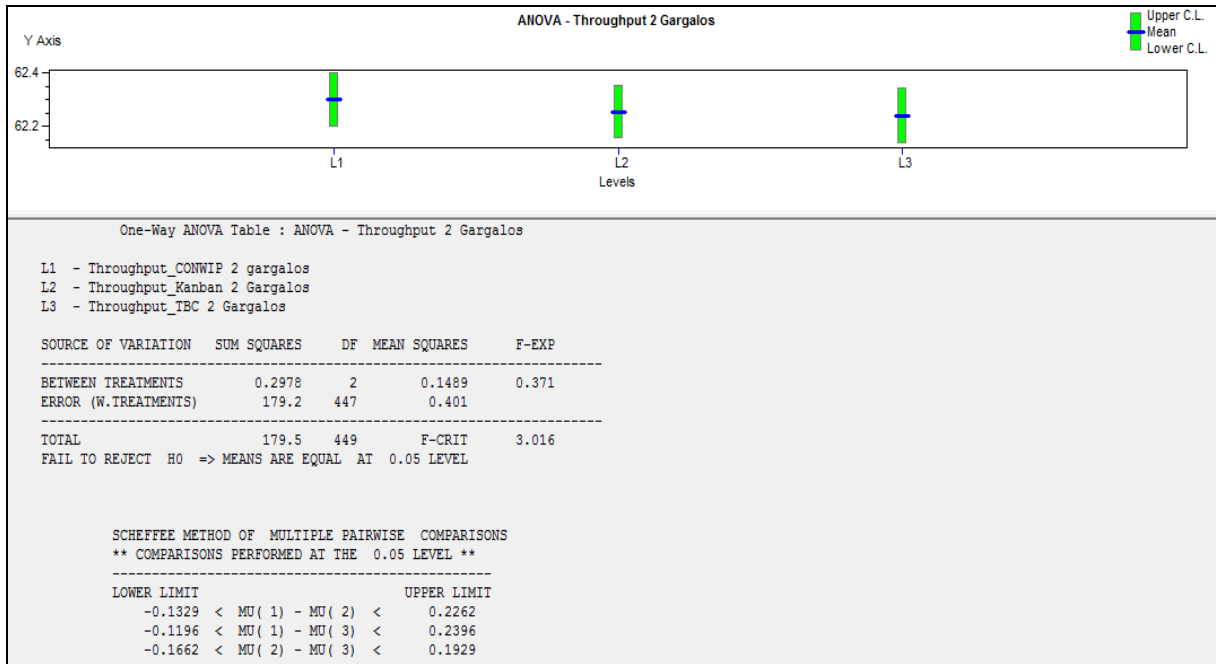
ANOVA para *throughput* do cenário de 1 gargalo



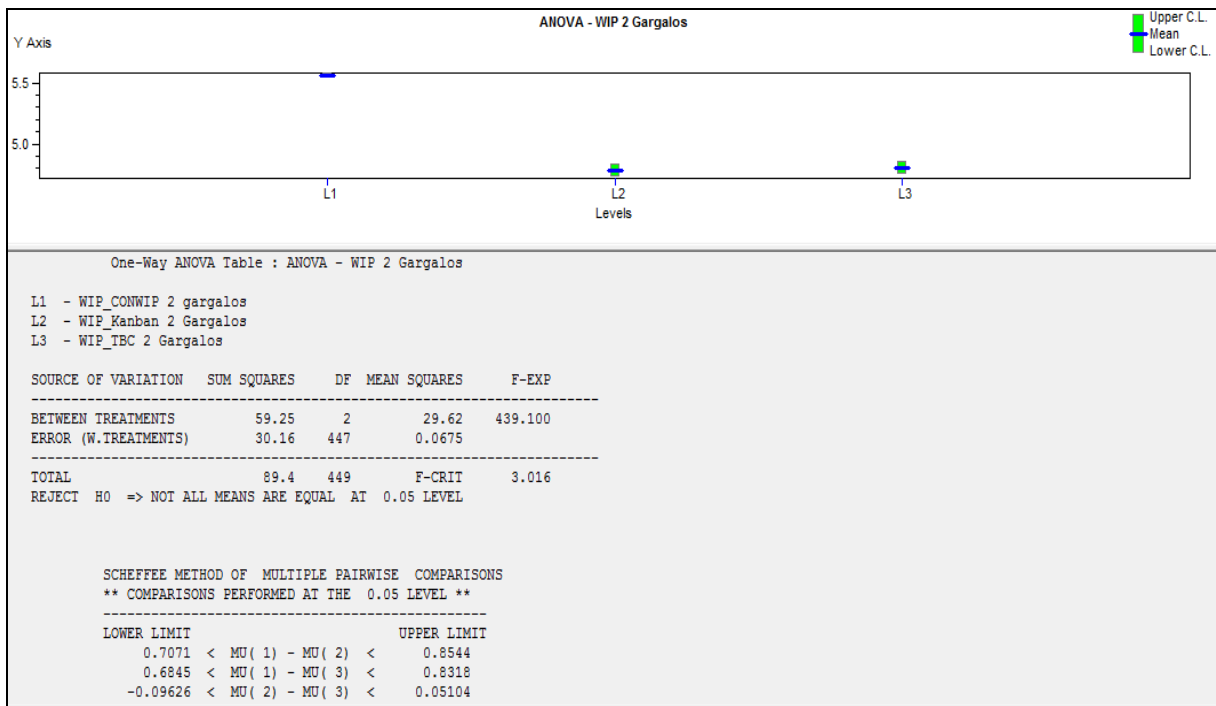
ANOVA para WIP do cenário de 1 gargalo



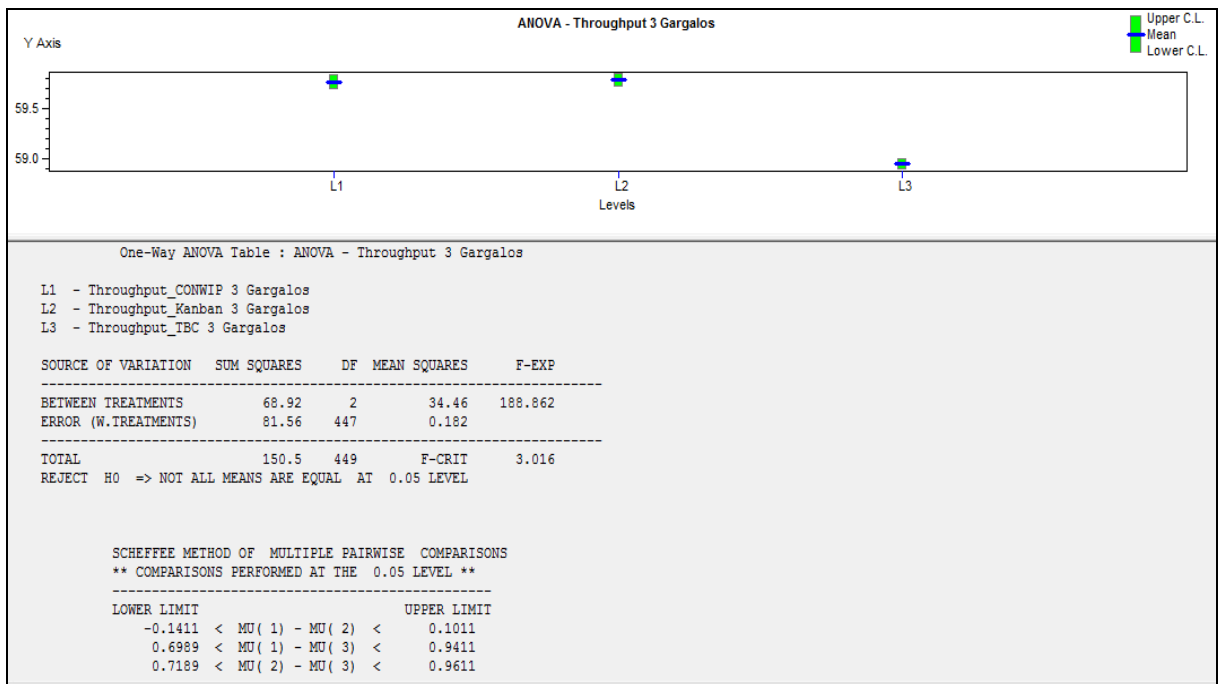
ANOVA para *throughput* do cenário de 2 gargalos



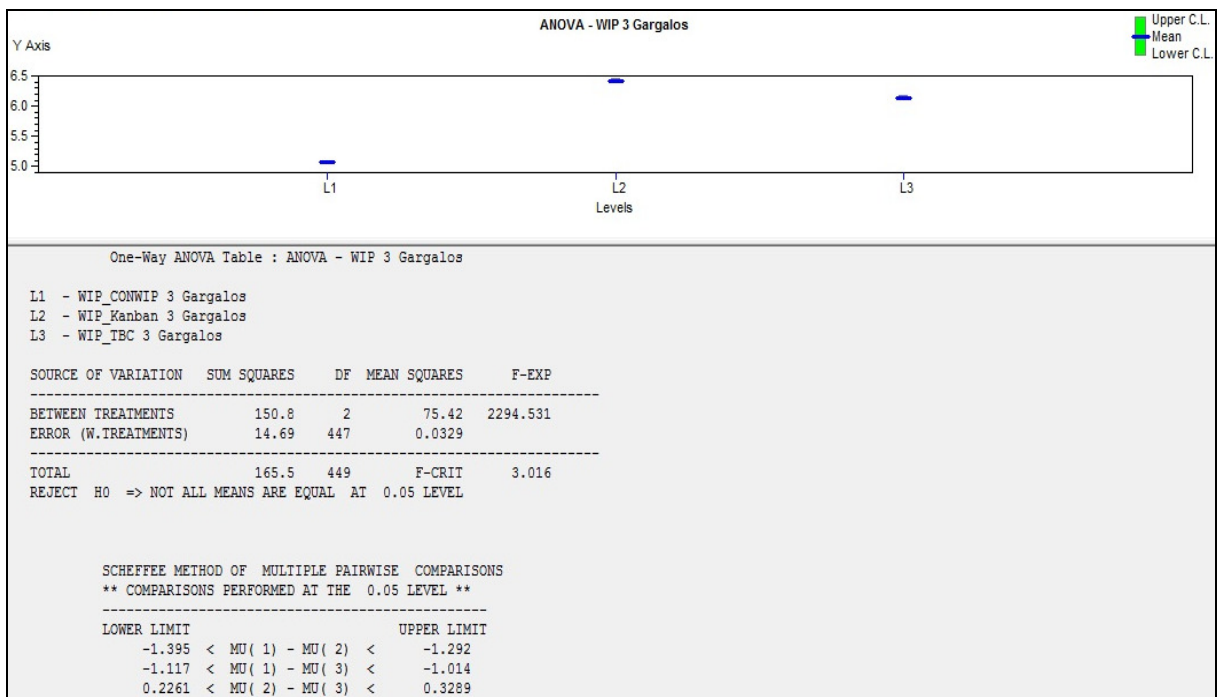
ANOVA para WIP do cenário de 2 gargalos



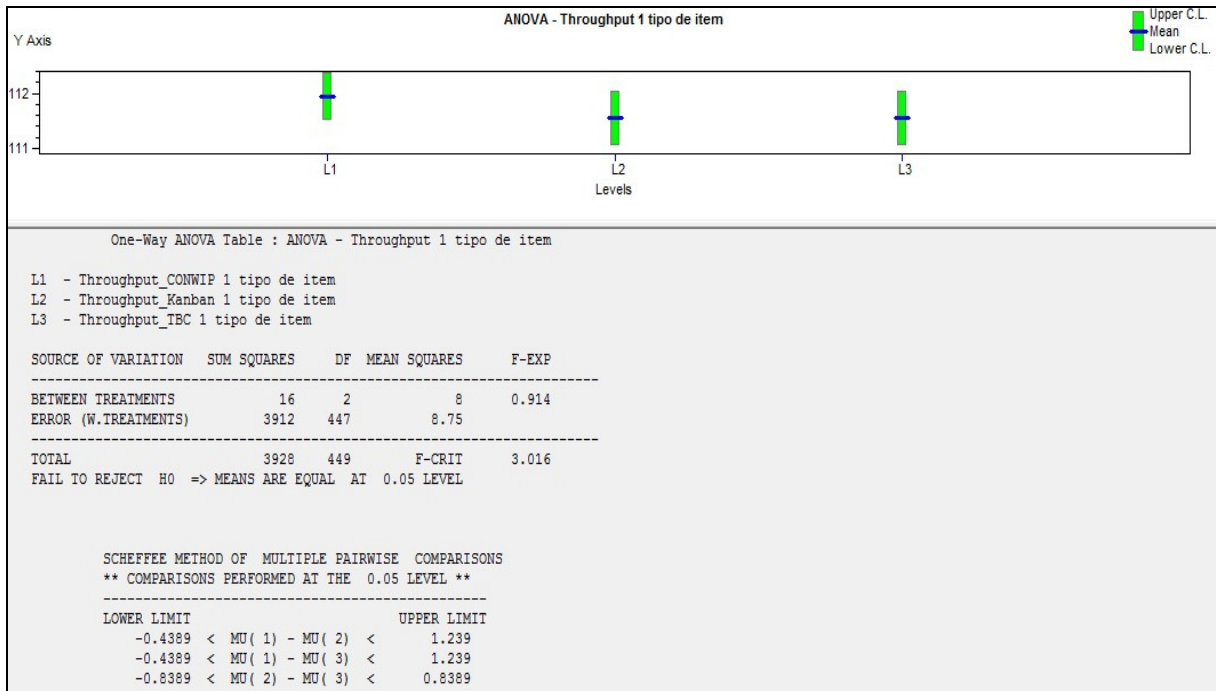
ANOVA para *throughput* do cenário de 3 gargalos



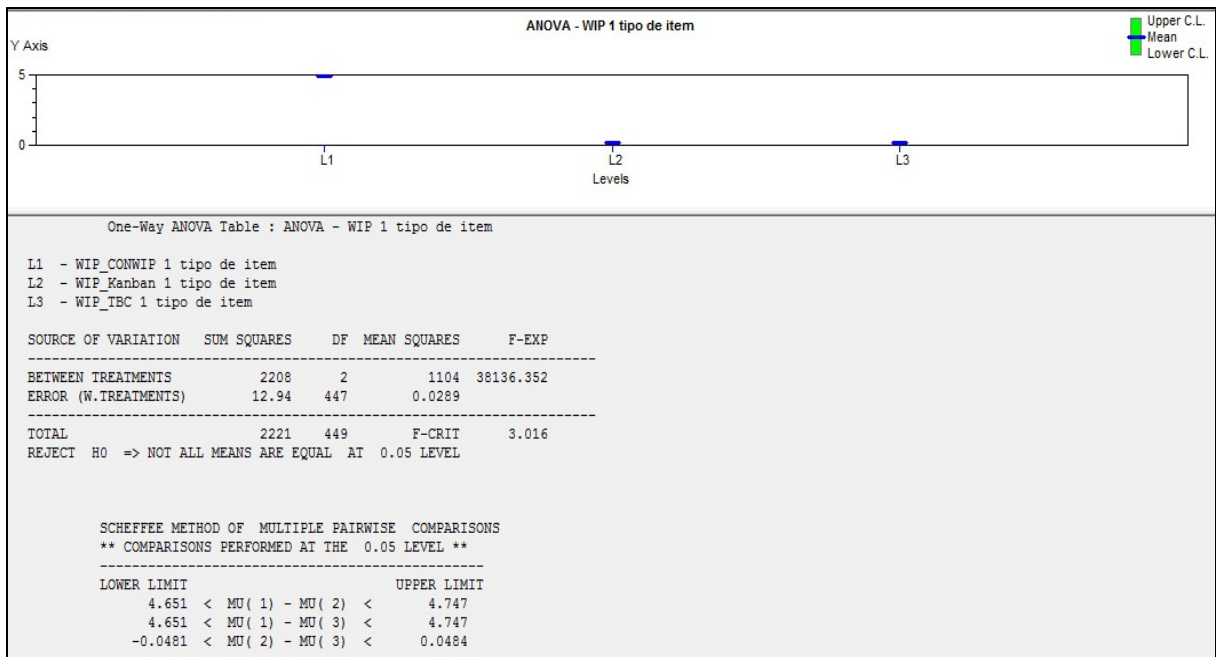
ANOVA para WIP do cenário de 3 gargalos



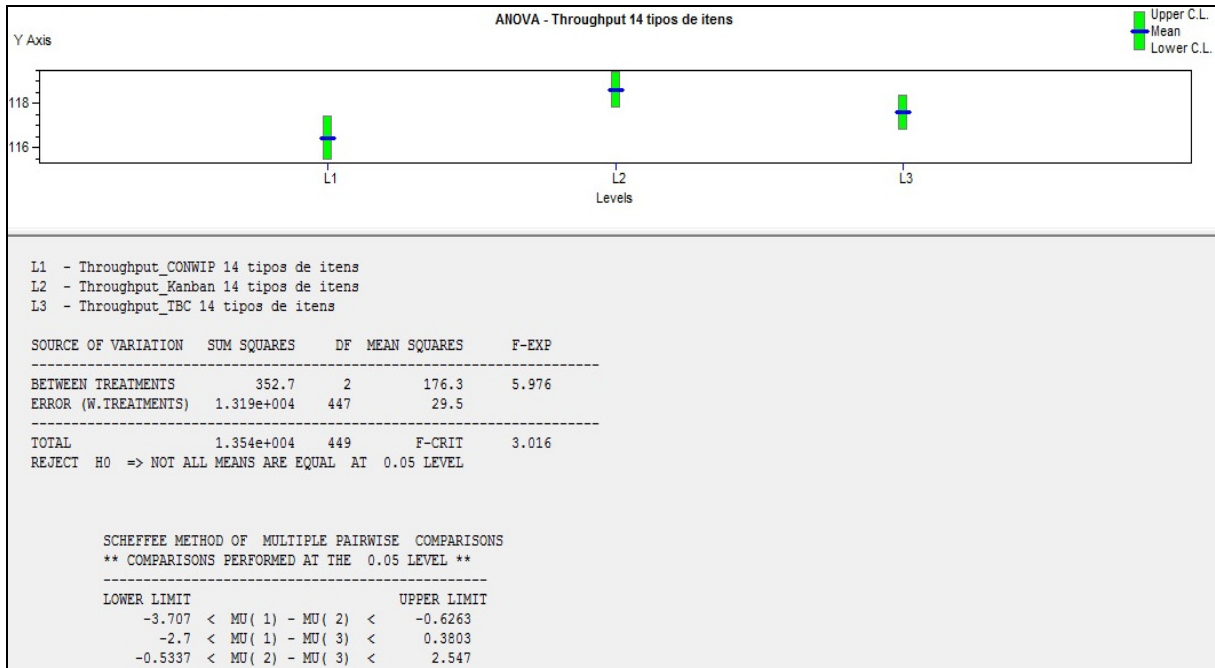
ANOVA para *throughput* do cenário de 1 tipo de item a ser produzido



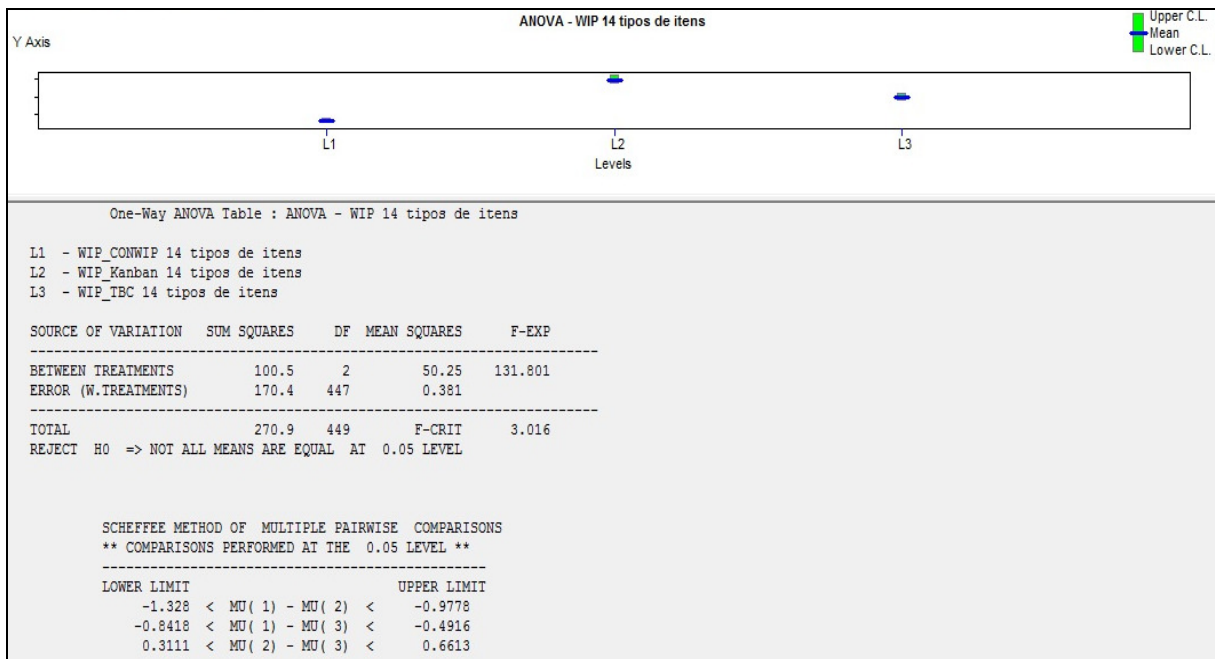
ANOVA para WIP do cenário de 1 tipo de item a ser produzido



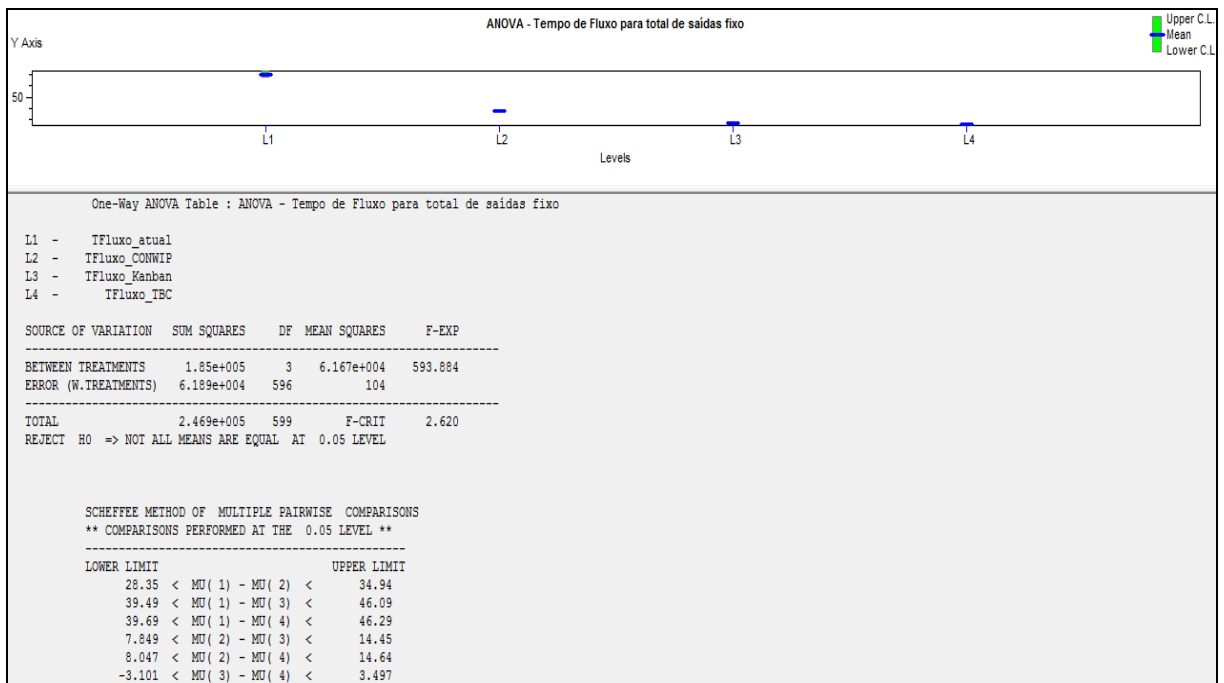
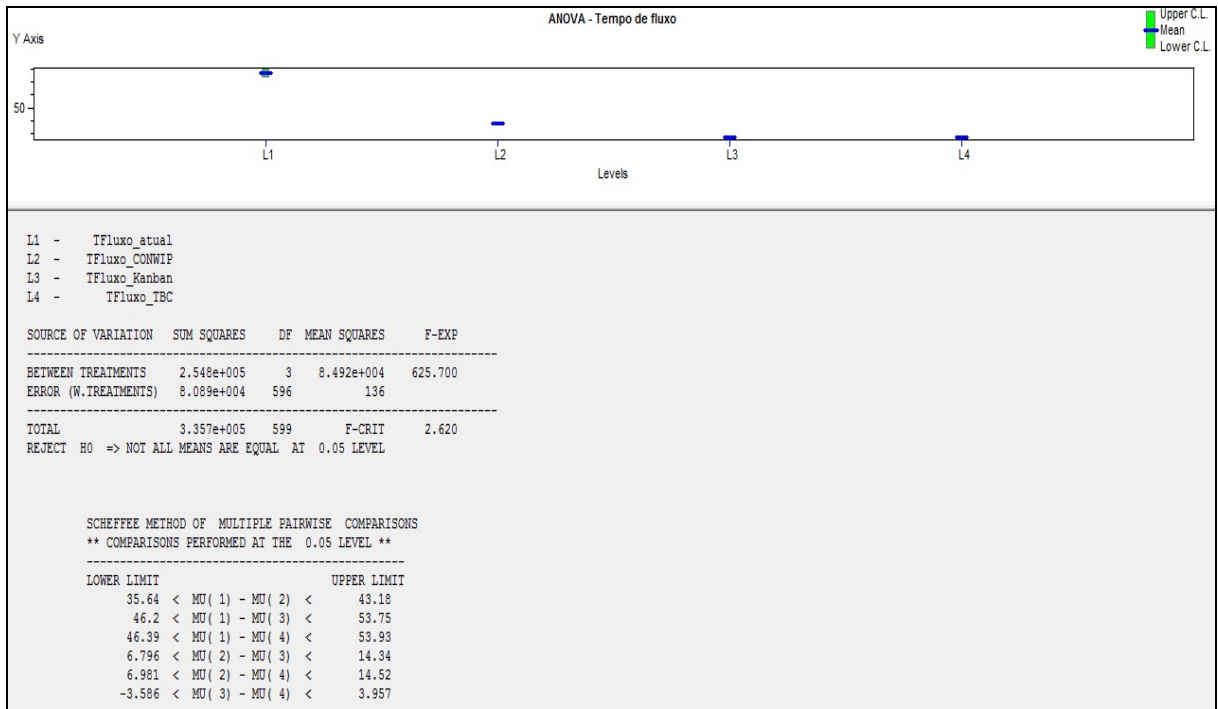
ANOVA para *throughput* do cenário de 14 tipos de itens a serem produzidos



ANOVA para *WIP* do cenário de 14 tipos de itens a serem produzidos



ANOVA para Tempo de Fluxo



ANOVA para Tempo de Fila

