

ELISEU PEREIRA DE LIMA

**O USO DA SIMULAÇÃO DE EVENTOS DISCRETOS COMO
FERRAMENTA DE APOIO NA DETECÇÃO DE GARGALOS
NOS SISTEMAS DE PRODUÇÃO E SUA APLICAÇÃO EM
UMA INDÚSTRIA QUÍMICA**

**SÃO CAETANO DO SUL
2007**

ELISEU PEREIRA DE LIMA

**O USO DA SIMULAÇÃO DE EVENTOS DISCRETOS COMO
FERRAMENTA DE APOIO NA DETECÇÃO DE GARGALOS
NOS SISTEMAS DE PRODUÇÃO E SUA APLICAÇÃO EM
UMA INDÚSTRIA QUÍMICA**

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia
Mauá do Centro Universitário do Instituto Mauá
de Tecnologia para a obtenção do Título de
Mestre em Engenharia de Processos Químicos e
Bioquímicos.

Linha de Pesquisa: Análise e Otimização de
Processos Industriais.

Orientador: Prof. Dr. Leonardo Chwif

**SÃO CAETANO DO SUL
2007**

FICHA CATALOGRÁFICA

Lima, Eliseu Pereira

**O uso da simulação de eventos discretos como ferramenta de apoio na detecção de gargalos nos sistemas de produção e sua aplicação em uma indústria química / Eliseu P. Lima. – São Caetano do Sul, SP: CEUN-EEM, 2007.
91 p.**

Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia Mauá do Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia, São Caetano do Sul, SP, 2007.

Orientador: Prof. Dr. Leonardo Chwif

1.Simulação 2.Analise de Gargalos 3.Modelagem de Processos I.Instituto Mauá de Tecnologia. Centro Universitário. Escola de Engenharia Mauá. II. Título.

Dedico esta dissertação

Aos meus amados pais Edmundo e Isaura.

À minha amada esposa Kathya.

À minha filha Mariana, meu maior
tesouro.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Leonardo Chwif, pela orientação, pela paciência e pelo apoio dado ao longo destes anos, quando muitas vezes impediu-me de desistir no meio do caminho.

A todos os meus familiares, pela serenidade, pelo auxílio pelo que passamos e pelo que ainda passaremos.

À Escola de Engenharia Mauá pela estrutura e recursos fornecidos. Aos coordenadores do curso de Mestrado pela compreensão demonstrada nos momentos difíceis.

Aos professores da banca examinadora por haverem aceitado a incumbência, por seu interesse e dedicação na tarefa de avaliar o conteúdo do texto e fornecer suas valiosas contribuições.

RESUMO

É necessário atuar nas restrições (gargalos de processos) para que as empresas possam obter mais velocidade em suas operações. No entanto, um gargalo não é tão facilmente detectável, especialmente quando se faz uso de métodos convencionais. Assim este trabalho versa sobre os principais métodos para a detecção de gargalos nos processos de produção, analisa os métodos existentes e se propõe a observar seus pontos fortes e fracos, a fim de auxiliar na escolha do melhor método a ser adotado em cada situação. Para isso, realizou-se um estudo de caso em um processo de envasamento de líquidos de uma indústria química e os resultados obtidos demonstraram que as técnicas fundamentadas em simulação de eventos discretos em conjunto com o método de detecção de gargalo baseado em tempos ativos para gargalos flutuantes proporcionam um grau de confiabilidade maior em relação a outros métodos de detecção comumente utilizados. Com o uso de critérios objetivos uma tabela de recomendações de uso foi desenvolvida ao término desse trabalho a qual auxilia a escolha do melhor método a ser aplicado.

Palavras-chave: Análise de Gargalos, Simulação de Eventos Discretos.

ABSTRACT

It's necessary to act on constraints, and processes bottlenecks so that companies can speed up its operations. A bottleneck, however, is not so easily detectable, specially when conventional bottlenecks detection methods are used. Therefore, this work analysis the detection methods and proposes to compare different methods for identifying the pro and cons of each one. A case study of a bottling process in chemical industry was conducted and results demonstrated that techniques based on discrete event simulation jointly with a method for bottleneck detection based on steady state and non-steady-state provides a higher degree of confidence in relation to other detection methods commonly used. After the study was conducted, a recommendation table that specifies the better usage of a given bottleneck detection method in some cases was created.

Key-words: Bottleneck Analysis, Discrete Events Simulation.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 2.1 – RELACIONAMENTO ENTRE “RECURSOS-GARGALO” E “RECURSOS NÃO-GARGALO”	20
FIGURA 2.2 – REPRESENTAÇÃO DE UM PROCESSO PRODUTIVO APRESENTANDO UM GARGALO SIMPLES.....	23
FIGURA 2.3 – REPRESENTAÇÃO DE PROCESSO PRODUTIVO APRESENTANDO GARGALOS MÚLTIPLOS.....	23
FIGURA 2.4 – REPRESENTAÇÃO DE UM PROCESSO PRODUTIVO ONDE GARGALOS FLUTUANTES SÃO APRESENTADOS	24
FIGURA 2.5 – REPRESENTAÇÃO DE UM PROCESSO PRODUTIVO COM O ESCOPO LIMITADO À PRODUÇÃO DE UM TIPO DE PRODUTO.....	24
FIGURA 2.6 – TELA DO <i>SOFTWARE</i> EM-PLANT PARA DEMONSTRAÇÃO DO GARGALO DETECTADO	34
FIGURA 2.7 – REPRESENTAÇÃO DE UM PROCESSO PRODUTIVO.....	34
FIGURA 2.8 - RELACIONAMENTO ENTRE OS PARÂMETROS E β	37
FIGURA 2.9 – FLUXO DE PROCESSAMENTO PARA ANÁLISE DE UM SBNS	39
FIGURA 2.10 – INFLUÊNCIA DE UM GARGALO MÓVEL NUMA PISTA COM VEÍCULOS	41
FIGURA 3.1 – SISTEMA COM AGV	42
FIGURA 3.2 – GRÁFICO DE PERCENTUAIS DE UTILIZAÇÃO	44
FIGURA 3.3 – TAMANHO DA FILA OU TEMPO DE ESPERA	46
FIGURA 3.4 – PERÍODOS ATIVOS DE UMA MÁQUINA DURANTE A SIMULAÇÃO	48
FIGURA 3.5 – GARGALOS FLUTUANTES	51
FIGURA 3.6 – GARGALOS FLUTUANTES- O GARGALO ÚNICO.....	52
FIGURA 3.7 – PROBABILIDADE DE GARGALOS FLUTUANTES.....	53
FIGURA 3.8 – GARGALOS E FALHAS DE MÁQUINA	53
FIGURA 3.9 – DADOS DE PRODUÇÃO – COMPARATIVO APÓS INCREMENTO	54
FIGURA 3.10 – COMPARATIVO DE GANHO ATRAVÉS DO TESTE DE SENSIBILIDADE	55
FIGURA 4.1 – MODELO DO PROCESSO UTILIZADO PELA EMPRESA.....	60
FIGURA 4.2 – MODELO DE SIMULAÇÃO DE UM PROCESSO REAL	61
FIGURA 4.3 – GRÁFICO COMPARATIVO ENTRE AS ESTAÇÕES DE PRODUÇÃO ATRAVÉS DO MÉTODO DE PERCENTUAL DE UTILIZAÇÃO (MODELO TOTAL)	64
FIGURA 4.4 – GRÁFICO COMPARATIVO ENTRE AS ESTAÇÕES DE PRODUÇÃO ATRAVÉS DO MÉTODO DE TAMANHO DE FILA EM FRENTE À MÁQUINA (MODELO TOTAL)	65

FIGURA 4.5 – GRÁFICO COMPARATIVO ENTRE AS ESTAÇÕES DE PRODUÇÃO ATRAVÉS DO MÉTODO DE TEMPO DE FILA EM FRENTE À MÁQUINA (MODELO TOTAL).....	65
FIGURA 4.6 – GRÁFICO COMPARATIVO ENTRE AS ESTAÇÕES DE PRODUÇÃO ATRAVÉS DO MÉTODO DE TEMPOS ATIVOS (MODELO TOTAL)	66
FIGURA 4.7 – GRÁFICO COMPARATIVO ENTRE AS ESTAÇÕES DE PRODUÇÃO ATRAVÉS DO MÉTODO DE TEMPOS ATIVOS EM GARGALOS FLUTUANTES (MODELO TOTAL)	66
FIGURA 4.8 – NOVO ESCOPO DE ANÁLISE PARA O MODELO	68
FIGURA 4.9 – NOVO ESCOPO DE ESTUDO PARA O MODELO DE SIMULAÇÃO DE UM PROCESSO REAL.....	69
FIGURA 4.10 – GRÁFICO COMPARATIVO ENTRE AS ESTAÇÕES DE PRODUÇÃO ATRAVÉS DO MÉTODO DO PERCENTUAL DE UTILIZAÇÃO (MODELO REDUZIDO)	70
FIGURA 4.11 – GRÁFICO COMPARATIVO ENTRE AS ESTAÇÕES DE PRODUÇÃO ATRAVÉS DO MÉTODO DO TAMANHO DA FILA EM FRENTE À MÁQUINA (MODELO REDUZIDO).....	71
FIGURA 4.12 – GRÁFICO COMPARATIVO ENTRE AS ESTAÇÕES DE PRODUÇÃO ATRAVÉS DO MÉTODO DO TEMPO DE FILA EM FRENTE À MÁQUINA (MODELO REDUZIDO).....	71
FIGURA 4.13 – GRÁFICO COMPARATIVO ENTRE AS ESTAÇÕES DE PRODUÇÃO ATRAVÉS DO MÉTODO DE TEMPOS ATIVOS (MODELO REDUZIDO).....	72
FIGURA 4.14 – GRÁFICO COMPARATIVO ENTRE AS ESTAÇÕES DE PRODUÇÃO ATRAVÉS DO MÉTODO DE GARGALOS FLUTUANTES (MODELO REDUZIDO).....	72
FIGURA A.1 – GRÁFICO DE GARGALOS FLUTUANTES (MODELO TOTAL).....	88
FIGURA B.1 – GRÁFICO DE GARGALOS FLUTUANTES (MODELO REDUZIDO).....	92

LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1 – TABELA DE DADOS DO PROCESSO DE MANUFATURA DA ENGRENAGEM	35
TABELA 3.1 – PARÂMETROS DAS MÁQUINAS	43
TABELA 3.2 – TRÁFEGO DO AGV	43
TABELA 3.3 – PERCENTUAL DE UTILIZAÇÃO DAS MÁQUINAS	43
TABELA 3.4 – TABELA DE ESTADOS ATIVOS E NÃO ATIVOS PARA DIFERENTES MÁQUINAS	47
TABELA 3.5 – TABELA DE INCREMENTO NO SISTEMA	54
TABELA 3.6 – TABELA DE SENSIBILIDADE DAS MÁQUINAS.....	55
TABELA 3.7 – TABELA COMPARATIVA ENTRE OS PRINCIPAIS MÉTODOS	57
TABELA 4.1 – TABELA DE TEMPOS ATIVOS E NÃO ATIVOS	58
TABELA 4.2 – TABELA COMPARATIVA ENTRE OS MÉTODOS (MODELO TOTAL COM A MÉDIA DE VALORES PARA 5 REPLICAÇÕES)	63
TABELA 4.3 – TABELA COMPARATIVA ENTRE OS MÉTODOS DE DETECÇÃO (MODELO REDUZIDO COM A MÉDIA DE VALORES PARA 7 REPLICAÇÕES).....	69
TABELA 5.1 – TABELA COMPARATIVA ENTRE OS PRINCIPAIS MÉTODOS (REFORMULADA)	75
TABELA 5.2 – TABELA DE RECOMENDAÇÕES DE USO	77
TABELA A.1 – CONSOLIDADO PERCENTUAL DE UTILIZAÇÃO (MODELO TOTAL).....	83
TABELA A.2 – CONSOLIDADO TAMANHO DE FILA EM FRENTE A MÁQUINA (MODELO TOTAL).....	84
TABELA A.3 – CONSOLIDADO TEMPO DE FILA EM FRENTE À MÁQUINA (MODELO TOTAL)	85
TABELA A.4 – CONSOLIDADO TEMPOS ATIVOS (MODELO TOTAL)	86
TABELA A.5 – CONSOLIDADO TEMPOS ATIVOS EM GARGALOS FLUTUANTES (MODELO TOTAL).....	87
TABELA B.1 – CONSOLIDADO PERCENTUAL DE UTILIZAÇÃO (MODELO REDUZIDO)	89
TABELA B.2 – CONSOLIDADO TAMANHO DA FILA EM FRENTE À MÁQUINA (MODELO REDUZIDO)	89
TABELA B.3 – CONSOLIDADO TEMPO DE FILA EM FRENTE À MÁQUINA (MODELO REDUZIDO)	90
TABELA B.4 – CONSOLIDADO TEMPOS ATIVOS (MODELO REDUZIDO).....	90
TABELA B.5 – CONSOLIDADO GARGALOS FLUTUANTES (MODELO REDUZIDO)	91

LISTA DE ABREVIATURAS

AGV	Automated Guided Vehicle
BN	Bottleneck
FIFO	First in First Out
JIT	Just in Time
OPT	Optimized Production Technology
SBNS	Single Bottleneck System
TOC	Theory of Constraints
WIP.....	Work in Process

SUMÁRIO

FICHA CATALOGRÁFICA	III
1.1 – HISTÓRICO.....	15
1.2 – MOTIVAÇÃO DO TRABALHO	15
1.3 – OBJETIVOS DO TRABALHO	16
1.4 – ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	16
2.1 – PRINCIPAIS MOTIVOS PARA A DETECÇÃO DE GARGALOS	17
2.2 – CONCEITUAÇÃO DE GARGALO.....	17
2.3 – EXEMPLIFICAÇÃO DE GARGALO.....	19
2.4 – GERENCIAMENTO DE GARGALO	21
2.5 – PRINCIPAIS TIPOS DE APRESENTAÇÃO DOS GARGALOS	22
2.6 – FORMAS DIRETAS DE DETECÇÃO DO GARGALO (MONITORAMENTO).....	25
2.7 – DISTINÇÃO ENTRE FORMAS ANALÍTICAS E FORMAS NÃO-ANALÍTICAS DE DETECÇÃO DE GARGALOS.....	26
2.8 – FORMAS NÃO-ANALÍTICAS DE DETECÇÃO DE GARGALOS (SIMULAÇÃO).....	27
2.8.1 - Principais Termos Utilizados na Simulação	27
2.8.2 - Definições Sobre Simulação de Sistemas Discretos	28
2.8.3 - Modelos de Simulação Discreta	29
2.8.4 - Aplicação da Simulação de Eventos Discretos	30
2.8.5 - A Simulação como uma Ferramenta Essencial para Análise de Processos.....	31
2.8.6 - O Uso da Simulação para o Estudo de Gargalos	32
2.8.7 - Teoria das Restrições.....	32
2.8.8 - <i>Softwares</i> de Mercado que trabalham com Simulação.....	33
2.9 – FORMAS ANALÍTICAS DE DETECÇÃO DE GARGALOS	34
2.9.1 – Média de Tempo de Espera em Frente à Máquina ou pelo Tamanho da Fila	34
2.9.2 – Medição de Gargalos Flutuantes.....	35
2.9.3 – Estimação de Gargalos.....	37
2.9.4 – O método através dos custos de <i>Setup</i>	38
2.10 – VISÕES SOBRE DETECÇÃO DE GARGALOS EM OUTRAS ÁREAS.....	39
3.1 – O USO DE UM EXEMPLO PARA ILUSTRAR OS CRITÉRIOS ABORDADOS.....	42
3.2 – ABORDAGEM ATRAVÉS DO CRITÉRIO BASEADO NO PERCENTUAL DE UTILIZAÇÃO	43
3.3 – ABORDAGEM ATRAVÉS DO CRITÉRIO DE TEMPO DE ESPERA NA FILA EM FRENTE À MÁQUINA OU PELO TAMANHO DA FILA	45
3.4 – ABORDAGEM ATRAVÉS DO CRITÉRIO DE PERÍODOS ATIVOS E NÃO ATIVOS	46
3.4.1 – Aplicação do Critério de Tempos Ativos e Não-Ativos em Gargalos Flutuantes (<i>Shifting Bottleneck</i>).....	49
3.4.2 – Aplicação do Critério de Tempos Ativos e Não-Ativos no exemplo do sistema AGV.....	51
3.5 – TESTE DE SENSIBILIDADE PARA AUXILIAR NA COMPARAÇÃO ENTRE OS MÉTODOS ABORDADOS.....	54
3.6 – ANÁLISE DA TABELA COMPARATIVA ENTRE OS PRINCIPAIS MÉTODOS ABORDADOS.....	55
4.1 – INTRODUÇÃO	58
4.2 – PADRÕES PARA INTERPRETAÇÃO DOS TEMPOS ATIVOS E NÃO-ATIVOS	58
4.3 – MODELO DE SIMULAÇÃO DO PROCESSO	59
4.3.1 – Informações Básicas do Processo	59
4.3.2 – Levantamento e Consolidação dos Dados para o Modelo de Simulação Total	61
4.3.3 – Análise dos Resultados Gerados pelo Modelo de Simulação	62
4.3.4 – Análise dos gráficos para determinação dos gargalos primários e secundários durante a simulação.....	63
4.4 – MODELO DE SIMULAÇÃO COM O PROCESSO REDUZIDO	67
4.4.1 – Levantamento e Consolidação dos Dados para o Modelo Reduzido	67
4.4.2 – Análise dos Resultados Gerados pelo Modelo de Simulação (Reduzido).....	68
4.4.3 – Análise da Flutuação de gargalos durante a simulação	73
5.1 – TABELA COMPARATIVA ENTRE OS PRINCIPAIS MÉTODOS.....	74
5.2 – ANÁLISE DOS RESULTADOS GERADOS NA TABELA COMPARATIVA.....	75
5.3 – DESENVOLVIMENTO DE UMA TABELA DE RECOMENDAÇÕES DE USOS.....	76

1 - INTRODUÇÃO

1.1 – HISTÓRICO

O estudo de processos gargalos¹ tomou uma grande dimensão após a obra de GOLDRATT (1992), A META. O autor apresentou em seu livro uma nova visão sobre como obter melhores resultados em processos produtivos a partir da identificação e da melhoria no desempenho de processos restritivos. Orientado pela simples idéia de que no ponto gargalo se encontra a causa raiz para o problema de desempenho de todo o processo, ele concluiu que implementar melhorias em outros pontos do processo não permitiria atingir os resultados desejados.

Outros estudos sobre esse tema são encontrados anteriormente, porém somente depois da referida publicação novos estudos e técnicas foram desenvolvidos tendo em vista esse novo conceito, o qual será abordado em mais detalhes ao longo dos tópicos. Paralelo a isso, a simulação computacional² tem se desenvolvido e hoje pode ser utilizada em conjunto com métodos para detecção de gargalos, auxilia assim, na melhoria dos processos produtivos.

1.2 – MOTIVAÇÃO DO TRABALHO

Segundo o ponto de vista do autor, a dificuldade em se determinar ou analisar (com um grau maior de confiabilidade) os pontos de restrição do processo “gargalo”, pode estar relacionada com os seguintes fatores:

- a. o baixo uso de métodos apropriados para detecção de gargalos no chão de fábrica;
- b. a complexidade da aplicação de métodos analíticos em processos especiais;
- c. o desconhecimento de métodos apropriados para a detecção de gargalos ou a não familiaridade com o uso de métodos de detecção de gargalos em conjunto com simulação computacional.

Durante a pesquisa, constatou-se a dificuldade em encontrar literatura sobre este assunto, visto que a maioria pertence ao campo da ciência da computação. Portanto, este trabalho visa

¹ Processos ou Recursos Gargalos – no presente trabalho refere-se a um equipamento (máquina) ou a um conjunto de equipamentos com a finalidade de processar um ou mais tipos de produtos.

² Conforme descrito em (SHANNON, 1975 apud CHWIF, 1999), “é um termo extremamente amplo e, basicamente, pode ser definido como o processo de elaboração de um modelo de um sistema real (ou hipotético) para condução de experimentos com a finalidade de entender o comportamento de um sistema ou avaliar sua operação”.

a contribuir para a escolha de métodos mais apropriados para a detecção de gargalos e para que novas pesquisas sobre o assunto sejam elaboradas.

1.3 – OBJETIVOS DO TRABALHO

O objetivo deste trabalho é analisar os principais métodos e critérios existentes para a análise e detecção de gargalos e aplicá-los em um modelo de simulação de um sistema real com 48 elementos entre máquinas e equipamentos (doravante denominados ESTAÇÕES DE PRODUÇÃO) em um processo de envase de líquidos em uma indústria química. Elaborar uma tabela comparativa entre os principais métodos utilizando-se de critérios quantitativos e compará-los para assim determinar qual o melhor método a ser utilizado em cada caso. Ao final do trabalho efetua conclusões sobre os principais métodos de detecção e sua aplicabilidade em função de determinadas características do processo, para que seja possível construir uma tabela de recomendações de uso.

1.4 – ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

No capítulo 2, faz-se uma revisão da bibliografia sobre “Análise de Gargalo” e sobre “Simulação de eventos discretos”.

No capítulo 3, serão descritos os principais métodos para detecção de gargalos.

No capítulo 4, serão aplicados os métodos analisados em um modelo de simulação de um sistema real (envase de líquidos).

No capítulo 5, serão discutidos os resultados gerados após a aplicação dos métodos no modelo de simulação de um sistema real, para que no final seja possível elaborar uma tabela comparativa entre elas.

. No capítulo 6, são apresentados as conclusões e os próximos passos em direção a trabalhos futuros.

2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 – PRINCIPAIS MOTIVOS PARA A DETECÇÃO DE GARGALOS

Os principais motivos que levam as empresas a investirem em ferramentas que permitam a detecção de gargalos em processos são:

1. Precisam atuar em mercados cuja vantagem competitiva é a velocidade nas suas operações (empresas que trabalham com frequências de entregas muito rápidas, empresas que lançam novos produtos em pouco espaço de tempo), precisam diminuir seus gargalos para proporcionar um maior ganho em velocidade de seus processos;
2. As restrições orçamentárias nas áreas destinadas à melhoria de processos dentro da indústria vêm fazendo com que os profissionais procurem por técnicas que sejam mais eficazes e que tenham um baixo custo de implementação;
3. Em outras empresas, a busca é motivada pela padronização nos métodos de detecção de gargalos, evita-se assim apenas o uso da intuição na análise de processos restritivos dentro do chão de fábrica.

2.2 – CONCEITUAÇÃO DE GARGALO

Este tópico conceitua o termo gargalo, apresenta uma breve descrição do termo e finalizando com uma descrição da influência que ele exerce nos sistemas produtivos.

De acordo com GOLDRATT (1992), o fluxo de processamento de todo sistema está limitado pela capacidade de diferentes máquinas e, de acordo com a natureza desse sistema, algumas máquinas podem afetar mais o desempenho do fluxo de processamento do que outras.

As máquinas que exercem influência nas demais e que restringem o sistema são comumente chamadas de “gargalo”. O termo gargalo, definido por ele, leva em consideração os novos conceitos gerados pelo OPT³ sugerindo que os objetivos da empresa possam ser redefinidos em termos de:

³ Segundo CÔRREA e GIANESI (1995), OPT é uma ferramenta que auxilia a programação de sistemas produtivos, procurando utilizar ao máximo os recursos com alta carga de demanda, ou seja, utilizar ao máximo os gargalos.

1. Fluxo de processo (*Throughout*): a razão pela qual a organização gera dinheiro através das vendas;
2. Estoque (*Inventory*): todo dinheiro do sistema investido em produtos que se pretende vender;
3. Despesa operacional (*Operating expense*): todo dinheiro do sistema gasto na administração do estoque (*Inventory*) e na produção de fluxo de processo (*Throughout*).

Ao utilizarem-se essas definições, o objetivo (A meta) é reduzir despesas operacionais e reduzir o estoque enquanto simultaneamente se incrementa o fluxo de processo. Como nenhuma organização tem continuamente um ótimo desempenho e/ou uma rentabilidade infinita, GOLDRATT (1992) argumenta que isto se deve às restrições existentes nas operações da organização.

Os autores NELLY e BYRNE definiram o conceito de recurso gargalo dentro da manufatura da seguinte maneira:

O gargalo é a máquina ou recurso mais lento na série de recursos usados para a manufatura de um produto. O fluxo de processo de produtos está condicionado ao fluxo de processo de uma única máquina. Aumentar o fluxo de processo nessa máquina significa aumentar o fluxo de processo de produtos de todo o sistema, enquanto outros recursos serão irrelevantes. (NELLY e BYRNE, 1992)

Uma analogia que exemplificaria melhor o termo gargalo pode ser demonstrada a partir da seguinte experiência: “Encher um copo de 300ml com água e uma garrafa de refrigerante também com 300ml de água; virá-las para baixo simultaneamente. A garrafa irá esvaziar mais lentamente do que o copo, pois seu pescoço restringe o fluxo. Daí provém o termo “gargalo” — a velocidade no ponto onde o fluxo é mais lento é que determina a velocidade do fluxo como um todo”.

Muitas são as definições a serem dadas ao termo gargalo, mas o mais importante é que, quando se depara em processos produtivos e ouvem-se frases tais como: “muito lento”, “insuficiente”, “não é muito rápido”, observa-se a real dimensão que um processo gargalo exerce sobre todos os processos da empresa, pois com processos mais restritivos, a empresa perde vantagem competitiva em relação à velocidade e, desse modo, gerar perdas consideráveis. “Entretanto, para que se possa melhorar o fluxo de processo nos gargalos, é necessário primeiro encontrar o gargalo. E encontrá-lo nem sempre é uma tarefa fácil.” Esta frase descrita pelos autores COX e SPENCER (1997) resume bem os problemas encontrados na manufatura quando se faz necessário promover melhorias no processo onde, muitas vezes, as variáveis que influenciam no aumento das restrições não são mapeáveis visualmente.

Assim, essas variáveis não são passíveis de serem notadas no “chão de fábrica” e, ocasionam, freqüentemente, diagnósticos falhos e esforços desnecessários na busca de soluções. Em todos esses casos, não só a necessidade de um estudo apropriado do processo bem como o uso de métodos que facilitem a identificação de restrições têm um papel fundamental na vida de uma empresa.

2.3 – EXEMPLIFICAÇÃO DE GARGALO⁴

Segundo GOLDRATT (1992) ou CORRÊA e GIANESI (1995), efetuar uma análise de gargalo é verificar o relacionamento entre recursos (“gargalo” e “não-gargalo”). Para exemplificar melhor esse relacionamento, considere uma análise dos quatro tipos possíveis de relacionamento entre estes dois recursos, conforme a figura 2.1. Considere-se um recurso gargalo “A”, assumindo que o total de toda demanda do mercado reflete uma utilização deste recurso de 100 horas/mês. Agora, como se trata de um recurso gargalo, levando-se em conta ainda que essa demanda é igual à possibilidade deste recurso, portanto, também igual a 100 horas/mês. O recurso gargalo, por definição, fica ocupado durante todo tempo de sua disponibilidade. Considere-se agora outro recurso “B”, “não-gargalo”, com as demandas do mercado as quais exigem uma ocupação de 75 horas/mês, sendo que ele também, a exemplo do recurso “A”, tem uma disponibilidade de 100 horas/mês.

Para melhor exemplificar os relacionamentos são descritos quatro casos básicos a seguir:

Caso 1 – Todo o fluxo é gerado do recurso “A” para o recurso “B”. Considerando essa situação, pode-se utilizar totalmente o recurso “A” (100%), mas só se pode utilizar o recurso “B” em 75% do tempo. O recurso “A”, por ser gargalo, não consegue produzir o suficiente para manter o recurso “B” trabalha todo o tempo.

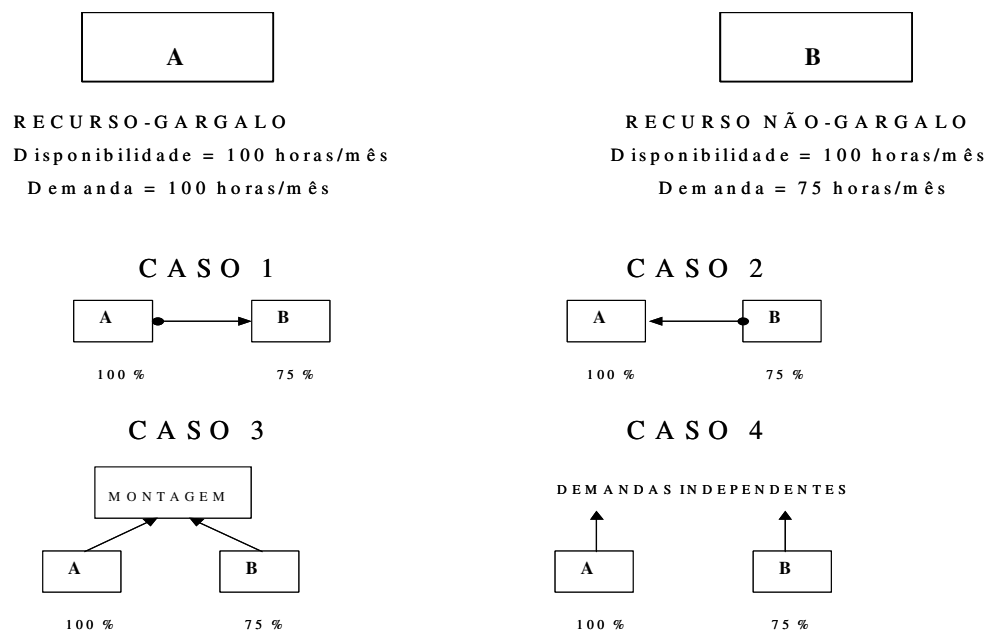
Caso 2 – Todo o fluxo é gerado do recurso “B” para o recurso “A”. Considerando essa situação, pode-se utilizar o recurso “A” 100% do tempo, e, se, houver matéria-prima suficiente, pode-se ativar o recurso “B” 100% do tempo também. Entretanto, levando-se em consideração que alguns dos objetivos na manufatura é tanto aumentar o fluxo quanto reduzir estoque e despesas operacionais, simultâneamente. Conclui-se que “B” só deveria ser ativado 75% do tempo, pois ativar “B” mais do que 75% do tempo implicaria na formação de estoque

⁴ Esse exemplo foi adaptado do livro *Just in time, MRPII, OPT: um enfoque estratégico* de CORRÊA e GIANESI de 1995, para melhor ilustrar o relacionamento entre recursos.

no processo entre o recurso “B” e o recurso “A”, sem se ter aumentado o fluxo, limitado pelo gargalo “A”.

Caso 3 – Os recursos “A” e “B”, em vez de alimentarem um ao outro, alimentam uma montagem que se utiliza às partes processadas em ambos. O recurso “A” pode ser utilizado em 100% do tempo; entretanto, se o recurso “B” for ativado por mais do que 75% do tempo, o estoque de processo se acumulará antes da montagem, já que também estará limitado pela capacidade de produção do recurso-gargalo “A”. Portanto, o recurso “B” deve, nesta situação também, ser ativado só em 75 % de seu tempo disponível.

Caso 4 – Os recursos “A” e “B” não alimentam um ao outro e nem a um outro recurso comum, mas alimentam demandas de mercado independentes. Uma vez mais, o recurso “A” pode ser utilizado 100% do tempo, mas o recurso “B” só pode ser utilizado 75% do tempo, sob pena de acumular estoques de produtos acabados, já que a demanda continua limitada e, para atendê-la, a utilização do recurso “B” por apenas 75% (75 horas/mês) do tempo é suficiente para atender a essa nova demanda.



FONTE: Corrêa e Gianesi, 1995.

FIGURA 2.1 – RELACIONAMENTO ENTRE “RECURSOS-GARGALO” E “RECURSOS NÃO-GARGALO”

Esses casos citados levam a concluir que, quaisquer que sejam as formas de relacionamento entre recursos, a presença de “recursos gargalo” exercem influência no fluxo total de qualquer sistema produtivo. Portanto, o gerenciamento desses gargalos torna-se muito

importante no processo de melhoria da produtividade; por isso, no próximo tópico, esse assunto será melhor abordado.

2.4 – GERENCIAMENTO DE GARGALO

Existem basicamente cinco passos que permitem o gerenciamento efetivo dos gargalos, os quais, segundo (GOLDRATT, 1990), são:

1. Identificar o gargalo;
2. Explorar e proteger o gargalo;
3. Subordinar os outros recursos ao gargalo;
4. Buscar a eliminação do gargalo;
5. Reavaliar as restrições do sistema na busca de novos gargalos.

A identificação do gargalo parte de uma avaliação das capacidades existentes e necessárias para a execução dos trabalhos planejados; aquele recurso que tiver capacidade disponível menor do que a capacidade necessária é um gargalo (GOLDRATT, 1991).

Explorar o gargalo significa utilizá-lo ao máximo, isto é, utilizá-lo com aqueles produtos que geram maior ganho. Proteger o gargalo significa garantir que não haverá falta de materiais para serem processados e, da mesma forma, evitar a entrada de materiais fora das especificações, que ocuparão o gargalo com peças já defeituosas e causem assim refugos ou retrabalhos. Também se deve evitar que haja perdas pós-gargalo, isto é, deve haver garantia de qualidade após o gargalo, para impossibilitar desperdícios de material, trabalho e tempo.

A formação de estoques intermediários está basicamente ligada aos gargalos e à sincronização da produção. Se os outros equipamentos têm maior capacidade do que o gargalo e produzem mais, ocorrerá um acúmulo de estoques junto ao gargalo, os quais ocasionarão perdas por estoques e por esperas. Por outro lado, uma má sincronização acarretará um aumento excessivo de estoques entre processos e, também, entre não-gargalos.

Buscar a redução do gargalo significa, muitas vezes, incrementar a sua capacidade. Isto pode ser feito de duas formas: ao eliminar perdas e tempos improdutivos e ao adicionar capacidade extra. A reavaliação do sistema consiste em retornar ao ponto inicial para a identificação de uma nova restrição, uma vez que a atual foi minimizada.

Geralmente, gargalos não são minimizáveis no curto prazo; quando possível, para administrá-los é necessário utilizar-se de um planejamento a longo prazo, como o planejamento agregado quando aplicável, que, segundo BUFFA e SARIN:

Elabora-se com base no Planejamento de Longo Prazo, o Planejamento Agregado de Produção, cujo resultado é um plano de médio prazo que estabelece níveis de produção, dimensões da força de trabalho e níveis de estoque. O horizonte do Plano Agregado de Produção pode variar de 6 a 24 meses, dependendo da atividade industrial. O planejamento é feito em termos de famílias de itens, isto é, os produtos a serem produzidos não são definidos de forma a terem uma constituição individual e completamente especificada, mas são agregados formando famílias de itens semelhantes. A atividade de planejamento agregado nem sempre é considerada de forma isolada, as particularidades de cada indústria, tais como previsibilidade da demanda e alto nível de repetição de produtos, fazendo com que muitas vezes possam não ser executadas. (BUFFA e SARIN, 1987)

Neste caso, ela tende a ser absorvida pelo Planejamento Mestre da Produção, que é uma atividade subsequente e mais detalhada, e leva em conta a demanda futura e predetermina a capacidade necessária para atendê-la.

Por intermédio dessas informações, obtém-se informações gerais acerca dos principais gargalos, o que permite planejar horas extras ou investimentos em novos equipamentos. Para que se consiga ter essa visão geral, faz-se necessário o monitoramento desses gargalos, justifica-se então seu gerenciamento através de métodos e ferramentas apropriadas.

2.5 – PRINCIPAIS TIPOS DE APRESENTAÇÃO DOS GARGALOS

Os principais tipos de gargalos encontrados são classificados da seguinte forma:

- gargalos simples (*Single Bottlenecks*);
- gargalos múltiplos (*Multiple Bottlenecks*);
- gargalos flutuantes (*Moving Bottlenecks/Shifting Bottlenecks*).

As figuras 2.2, 2.3 e 2.4 procuram ilustrar respectivamente as diferenças entre um tipo e outro, por meio do comportamento do gargalo.

No exemplo, ilustrado pela figura 2.2, a empresa possui um setor para produção de engrenagens em que o fluxo é bem definido e apresenta a máquina 3 como um gargalo simples ou estático. Neste caso, em 100% do tempo, o gargalo fica na máquina 3 e somente na máquina 3.

GARGALOS SIMPLES

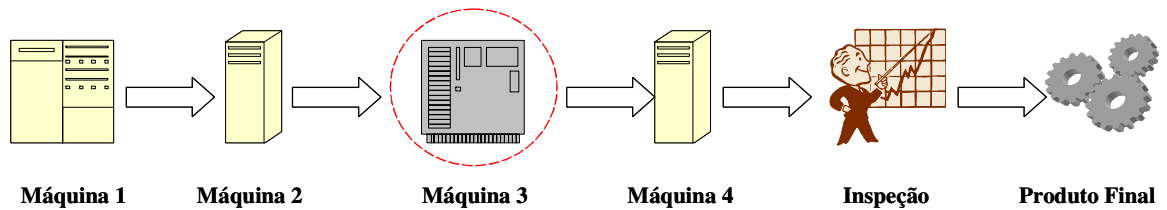


FIGURA 2.2 – REPRESENTAÇÃO DE UM PROCESSO PRODUTIVO APRESENTANDO UM GARGALO SIMPLES

No exemplo ilustrado pela figura 2.3, a empresa possui um setor para produção de dois produtos em que os fluxos de processo possuem como gargalo as máquinas 3 e 6, respectivamente. Neste caso, há dois gargalos estáticos ficando 100% do tempo permanentemente nessas duas máquinas.

GARGALOS MÚLTIPLOS

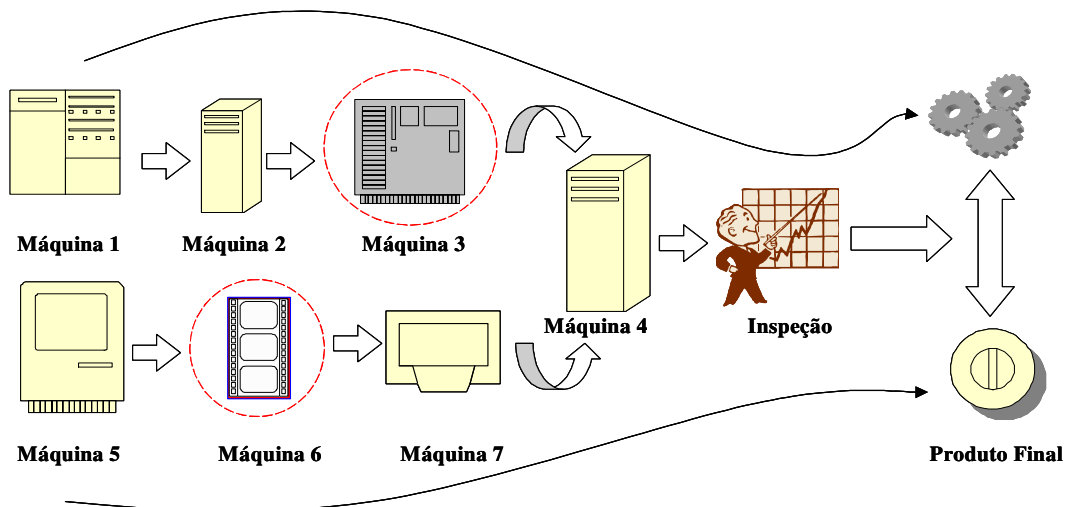


FIGURA 2.3 – REPRESENTAÇÃO DE PROCESSO PRODUTIVO APRESENTANDO GARGALOS MÚLTIPLOS

Agora, no exemplo da figura 2.4, a empresa possui um *mix* de produtos que são manufaturados dentro de um setor produtivo de acordo com a programação de produção, que é predeterminada, os produtos seguem fluxos diferentes nesse setor produtivo. A presença de gargalos nesse processo sofre variações ao longo do tempo, em função do fluxo e dos tipos de produtos a serem manufaturados. As freqüentes mudanças dos gargalos fazem com que não se consiga atuar em apenas uma máquina ou em apenas um processo, pois o gargalo possui características dinâmicas que, por sua vez, dificulta sua identificação.

A figura 2.5 demonstra que é possível isolar o escopo de observação de um sistema (as linhas tracejadas delimitam o escopo de observação) para que seja possível efetuar um estudo específico do processo. Nesse processo descrito, restringiu-se a observação do sistema na produção da engrenagem, e, nesse limite, a forma de gargalo apresentada é a de um gargalo simples, ao invés de uma forma de gargalos múltiplos ou de gargalos flutuantes, porém, vale lembrar que o gargalo real do sistema permanecerá o mesmo do processo completo, pois a redução do escopo não muda fisicamente a restrição.

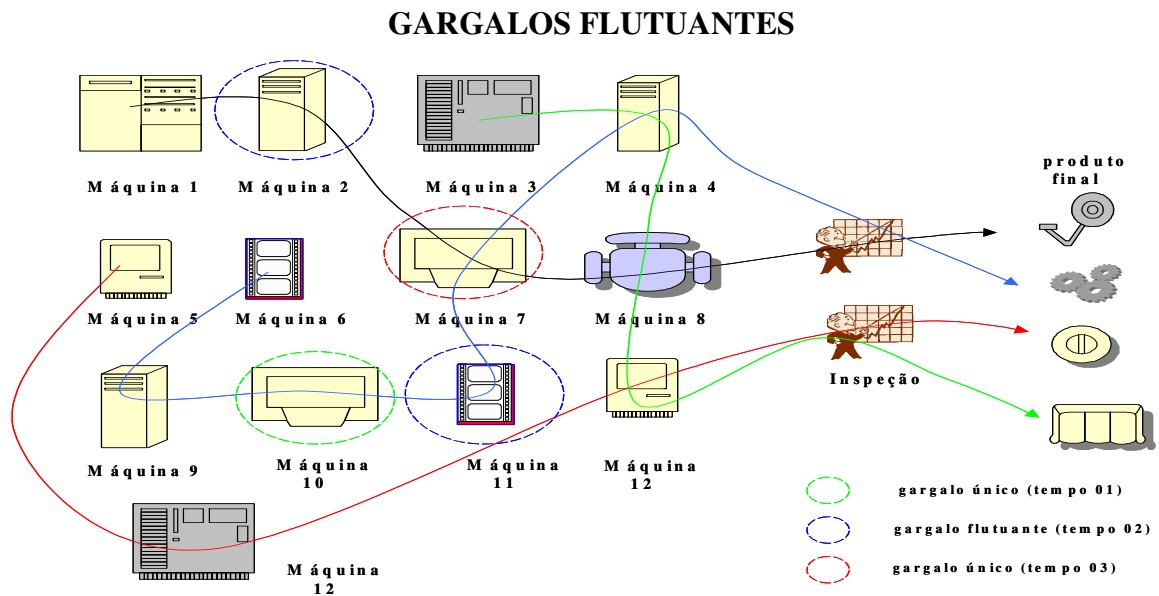


FIGURA 2.4 – REPRESENTAÇÃO DE UM PROCESSO PRODUTIVO ONDE GARGALOS FLUTUANTES SÃO APRESENTADOS

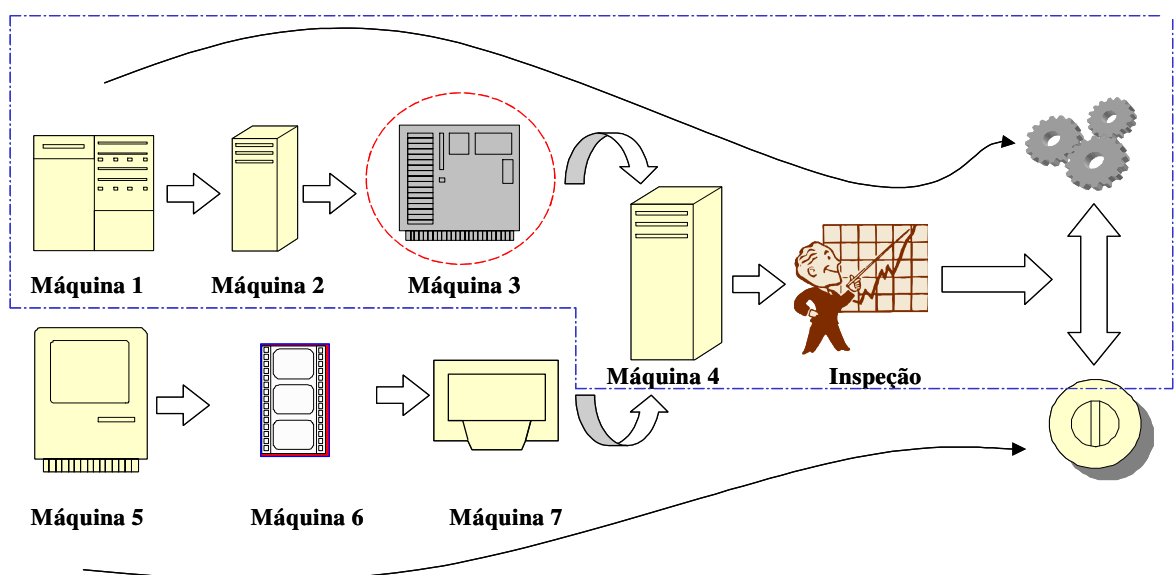


FIGURA 2.5 – REPRESENTAÇÃO DE UM PROCESSO PRODUTIVO COM O ESCOPO LIMITADO À PRODUÇÃO DE UM TIPO DE PRODUTO

2.6 – FORMAS DIRETAS DE DETECÇÃO DO GARGALO (MONITORAMENTO).

Faz-se necessário distinguir as principais formas de detecção de gargalos para melhor compreensão das metodologias abordadas neste trabalho, as quais são divididas em: Formas Diretas (Monitoramento *On-Line* ou Monitoramento *Off-Line*) e Formas Indiretas (Métodos Analíticos, Métodos Não-Analíticos).

No processo de monitoramento *On-Line* é feito por meio de sensores instalados nos diversos pontos do processo. As informações são captadas a uma frequência preestabelecida e consolidadas em uma central de processamento e geram, dessa maneira, informações sobre o comportamento do sistema. No monitoramento *On-Line* de gargalos, as informações captadas e consolidadas são formatadas e, muitas vezes, apresentadas de forma amigável em *softwares* específicos para esse fim. De posse dessas informações, as áreas responsáveis pelo controle do processo conseguem atuar diretamente no processo e buscam minimizar as restrições.

Segundo TANAKA, NAKANO e ROSER (2003), em um contexto dinâmico, o método mais aconselhado para detecção de gargalos seria o método de detecção de gargalos flutuantes. O argumento dos autores fundamenta-se na questão de identificação do gargalo, pelo fato de que os sistemas de manufatura não são estáticos, mas variam constantemente ao longo do tempo, sendo uma dessas causas de variações os eventos randômicos, como por exemplo, uma falha na máquina ou outros tipos de paradas temporárias. Com isso, uma máquina pode vir a ser gargalo apenas por um curto período de tempo, até que o problema seja resolvido e o sistema retorne para o seu estado normal. Um sistema de manufatura geralmente não apresenta apenas uma máquina gargalo, mas sim um certo número de máquinas que podem restringir o sistema em diferentes tempos. A utilização de métodos para o monitoramento *On-Line* dessas restrições permite aos supervisores atuarem no processo assim que um gargalo é identificado.

No processo de monitoramento *Off-Line* pode ser obtido por meio do histórico de resultados extraídos em processos passados ou pelo levantamento de dados e variáveis necessárias à reprodução e simulação dos processos em que se deseja estudar (geralmente, as empresas possuem uma área de Tempos e Métodos que coletam e armazenam esses dados). Comumente utilizados quando o sistema produtivo tem um desempenho inferior ao esperado e faz-se necessário um estudo do processo para posterior melhoria, ou na fase de desenvolvimento de novos processos em que se deseja conhecer o comportamento do processo antes mesmo de finalização do *layout* de posicionamento dos equipamentos no

“chão de fábrica” e, permitem, assim, antecipar-se prováveis problemas de desempenho do sistema.

Esse tipo de monitoramento é o mais utilizado na indústria, devido ao seu baixo custo de implementação. Os dados são captados manualmente ou pelos históricos e compilados antes de serem utilizados por *softwares* (planilhas eletrônicas ou aplicativos de simulação) e os resultados obtidos são capazes de refletirem a situação atual do processo.

2.7 – DISTINÇÃO ENTRE FORMAS ANALÍTICAS E FORMAS NÃO-ANALÍTICAS DE DETECÇÃO DE GARGALOS

Faz-se necessário distinguir as formas analíticas das formas não-analíticas de detecção de gargalo para melhor compreensão das metodologias abordadas neste trabalho. As formas não-analíticas de detecção de gargalo podem ser obtidas por meio do uso da simulação computacional, dispensam fórmulas matemáticas em sua composição, mas apenas informações dos tempos e estados de cada componente envolvido no sistema. Por outro lado, as formas analíticas trabalham basicamente com fórmulas matemáticas. Ao conhecer-se o modelo matemático de um sistema, é possível, por vezes, obter informações que levam a conclusões sobre o ponto de gargalo no processo.

Apesar da pouca aplicabilidade em diversas áreas, devido à complexidade de compreensão ou de implementação, serão descritas a seguir outras formas analíticas utilizadas, as quais permitem detectar e analisar o gargalo em produção.

LUTHI e HARING (1997) descrevem uma abordagem que determina a probabilidade de gargalos múltiplos baseada na porcentagem de tempo em que as máquinas encontram-se ativas, para tal utilizam uma matriz de probabilidade de gargalo. Os pesquisadores BERGER, BREGMAN e KOGAN (1999) também investigam todas as possibilidades de combinações de gargalo, já que, para sistemas mais complexos, a aplicação dessa abordagem por meio da probabilidade de gargalos múltiplos se torna menos direta. Finalmente, BLAKE e BRESSE (1995) descrevem uma forma automática para detecção de gargalos em redes de computadores que também leva em consideração a carga de trabalho em combinação com a teoria das decisões.

Existem outras possibilidades de detecção de gargalo pela análise estrutural do sistema, como foi apresentado nos trabalhos de COX e SPENCER (1997) ou em LAPIN (1998), que considera o procedimento de solução numérica que busca soluções ótimas via processo de tentativa e erro. Esse procedimento aplica-se praticamente a todo o problema de

decisão que envolve incerteza e é uma aproximação da solução do problema que oferece muitas vantagens sobre métodos analíticos tradicionais. A grande vantagem da simulação, segundo LAPIN (1998), é que se consegue respostas para problemas de difícil ou quase impossível solução caso fossem utilizados somente caminhos matemáticos. Porém, a complexidade desse método inviabiliza sua aplicação em grande escala nas indústrias.

2.8 –FORMAS NÃO-ANALÍTICAS DE DETECÇÃO DE GARGALOS (SIMULAÇÃO)

Esse tópico procura dissertar sobre o uso da simulação de eventos discretos como uma ferramenta de apoio na análise de gargalos. Segundo HOLLOCKS (2001) nota-se um aumento no uso da simulação de eventos discretos por parte de usuários não especialistas em simulação. Até pouco tempo atrás, somente o especialista de áreas, tais como as de pesquisa operacional e engenharia industrial, construía e executava os modelos. No entanto, isso tem mudado. Os estudos feitos por HOLLOCKS (2001) revelaram que, apesar do uso atual da simulação ainda ser feito por especialistas, a simulação vem freqüentemente sendo utilizada dentro de grupos de resolução de problemas, como por exemplo, engenheiros e planejadores.

Nas literaturas comerciais de *software* de simulação, esta visão é reforçada e a inclusão de frases, tais como as: “Sem necessidade de especialista em computação”, “Desenvolvido para o usuário final”, “Apenas para usuários inexperientes” ou “Para uso de engenheiros ou outras áreas envolvidas” demonstram que esses *softwares* estão cada vez mais tendo interfaces amigáveis. Contudo, faz necessário definir os principais termos utilizados na simulação e exemplificar algumas aplicabilidades na área de análise de gargalos.

2.8.1 - Principais Termos Utilizados na Simulação

O objetivo desse tópico é estabelecer alguns termos e unificar os conceitos a fim de permitir um melhor entendimento nos tópicos desta dissertação. Em função da ampla abrangência da simulação computacional serão descritos apenas os principais termos expostos a seguir.

O termo “simulação” segundo SHANNON (1975) é o processo de elaboração de um modelo de um sistema real (ou hipotético) e a condução de experimentos com finalidade de entender o comportamento de um sistema ou avaliar sua operação.

O termo “sistema”, para GORDON (1999), é utilizado numa grande variedade de modos, sendo difícil produzir uma definição suficientemente abrangente para cobrir vários usos e, ao mesmo tempo, concisa o suficiente para ter um propósito útil. Uma definição

simples pode ser: “sistema” é um agrupamento de partes que operam juntas, visam um objetivo em comum (FORRESTER, 1968). Em outras palavras, para CASSANDRAS (1993) um “sistema” é uma combinação de componentes que atua conjuntamente para a realização de uma função que não é possível ser feita com qualquer componente individual.

O termo “estado de um sistema” pode ser definido por meio de uma coleção de variáveis necessárias para descrevê-lo totalmente em um dado instante LAW e KELTON (1991). Esta coleção é denominada de “variáveis de estado”.

O termo “entidade” é qualquer objeto de interesse do modelo enquanto o termo “atributo” é uma propriedade desta entidade. Já o termo “atividade” é qualquer processo que cause uma mudança no estado (BANKS, 1996).

2.8.2 - Definições Sobre Simulação de Sistemas Discretos

GORDON (1978) faz o estudo de sistemas de simulação discretos. Um modelo para um sistema discreto possui um conjunto de variáveis chamadas de estado. No decorrer de uma simulação, os indicadores de estado mudam seu valor. Um evento discreto é definido por GORDON (1978) como um conjunto de circunstâncias que causam uma mudança instantânea em um ou mais índices de estado.

Segundo LAW (1991) e BANKS (1996) um sistema de eventos discretos está relacionado a um sistema cujos estados dependem do tempo. Nestes sistemas os estados mudam instantaneamente em pontos discretos neste tempo. Em termos matemáticos, pode-se dizer que o sistema muda seu estado apenas em alguns números de pontos “contáveis” no tempo. Existem dois métodos básicos para atualizar o tempo. Um método é avançar o tempo para o horário em que o próximo evento irá ocorrer e que é chamado de orientado a eventos. O segundo, comumente chamado de orientado a intervalos, consiste em avançar o tempo em pequenos intervalos (normalmente constantes) e determinar para cada intervalo se um evento deve ocorrer naquele tempo.

Os sistemas de simulação discretos costumam usar o método de orientação a eventos. Outro aspecto é a geração de chegadas de eventos onde as seqüências de entradas podem ser geradas pela observação do sistema e uma chegada é definida como um evento de tempo. Quando o tempo chega neste evento, a simulação é executada e o tempo de chegada do próximo evento é imediatamente calculado por uma distribuição de intervalos entre chegadas.

2.8.3 - Modelos de Simulação Discreta

Uma definição para modelo de simulação pode ser a da representação das relações de componentes de um sistema, sendo considerada como uma abstração, no sentido em que tende a se aproximar do verdadeiro comportamento do sistema. Esses modelos classificam-se em: modelos simbólicos (ou icônicos), modelos analíticos e modelos de simulação (CHWIF, 1999).

Os modelos simbólicos são constituídos de símbolos gráficos utilizados para dar noção de sequência ou outras relações entre entidades. Os modelos analíticos basicamente podem ser reduzidos a um conjunto de equações que, ao serem resolvidas, permitem obter a solução esperada. Os modelos de simulação são implementados através do auxílio de um computador. Assim, como um modelo analítico pode ser representado por um conjunto de equações, um modelo de simulação pode ser representado através de codificação e estruturação utilizando-se de linguagens de programação para *softwares*. Para tal, ao contrário dos modelos analíticos, os modelos de simulação são executados, ao invés de solucionados. As desvantagens dos modelos de simulação são: podem ser difíceis de se construir e podem levar a resultados menos precisos do que os modelos analíticos. Em contrapartida, são modelos excelentes para representar sistemas que possuem um número muito grande de variáveis e com dinâmica muito complexa. (CHWIF, 1999)

Ainda, segundo SALIBY (1989), toda simulação requer a construção de um modelo com o qual são feitos os experimentos. Este modelo pode ser definido por um conjunto de relações lógico-matemáticas descritas geralmente por um programa de computador. Dependendo do tipo de modelo, uma simulação pode ser:

- a) Determinística ou probabilística – Uma simulação é determinística quando todas as variáveis presentes são também determinísticas. Já a simulação probabilística baseia-se geralmente na descrição mais próxima e também mais complexa da realidade. O modelo contém uma ou mais variáveis aleatórias, cujo papel em uma simulação é representado por meio de amostras.
- b) Estático ou Dinâmico – Uma simulação é estática quando é definida por situações em que a dimensão do tempo não é relevante e é dinâmica quando se refere ao estudo de um sistema ao longo do tempo.
- c) Discreta ou Contínua – Em uma simulação discreta, a passagem do tempo é feita por intervalos de tempo entre um evento e outro. Neste caso, supõe-se que o estado do sistema não se altera ao longo do intervalo compreendido entre dois eventos consecutivos. Note-se, no entanto, que esta discretização não diz respeito aos valores assumidos pelas variáveis do modelo que, do

ponto de vista numérico, serão discretas ou não. Numa simulação contínua, a passagem do tempo é vista como se fosse realmente contínua, muito embora ela seja feita a pequenos intervalos de tempo, por imposição do método empregado e do próprio computador.

2.8.4 - Aplicação da Simulação de Eventos Discretos

Segundo LAW (1991) e BANKS (1996) o crescente aumento tecnológico nos setores de *hardware* tem permitido às empresas aperfeiçoarem seus aplicativos e conseqüentemente aumentarem o uso de *software* de simulação. Em seus artigos BANKS (1996) e BANKS (2000) descrevem que os administradores estão compreendendo melhor o uso de simuladores em seus processos e visam obter vantagem competitiva em seus negócios, isso também é afirmado nos artigos de BLAKE, RUSSEL, BRESSE (1995). Alguns autores como LAW (1991), BANKS (1996) e CASSANDRAS (1993) citam as vantagens obtidas com a simulação:

- permitir a escolha correta dos melhores processos, sem comprometer os recursos existentes ou recursos para aquisição;
- possibilitar a compressão e expansão do tempo, facilitando a aceleração dos processos para verificação de fenômenos e até mesmo gastar mais tempo simulando um evento isolado;
- ajudar na compreensão do “Por quê?”, ocorridos em um sistema real;
- auxiliar no diagnóstico de problemas, quando a organização ou o tipo de serviço é muito complexo;
- desenvolver a compreensão do processo como um todo, inclusive na previsão de como o sistema operará quando for efetuada alguma mudança;
- melhorar o custo benefício, tendo em vista que em geral as despesas com simulação chegam a menos do que 1% do gasto total na implementação de projeto. Existe a vantagem da aprendizagem pelos colaboradores “ao aprenderem com seus erros” e, desse modo, operam melhor o sistema;

Os mesmos autores colocam algumas desvantagens da simulação:

- requer mão-de-obra especializada e treinada para desenvolver e efetuar análise;
- analisar e modelar consome grande parte de tempo e recurso e, mesmo assim, corre-se o risco do resultado não atender as necessidades;

- utilizar a simulação de maneira inapropriada em alguns casos quando uma solução analítica é possível ou preferível.

2.8.5 - A Simulação como uma Ferramenta Essencial para Análise de Processos

Em seus artigos O'KANE, SPENCELEY e TAYLOR (2000) destacam a modelagem e simulação como sendo uma das mais populares técnicas empregadas para a análise de sistemas complexos de manufatura. Eles descrevem que, dentro do ciclo de vida da manufatura, a simulação pode ser aplicada tanto na fase de justificativa de implementação quanto na fase de desenvolvimento dos programas de tecnologia de manufatura. Mas é durante a fase operacional que a simulação provém potencialmente com alguns grandes resultados.

Um grande número de autores tem investigado os benefícios do uso da simulação para acompanhamento de desenvolvimento de novos *layouts* e protótipos de fábricas. ELORANTA (1997) discute este assunto pela proposta do uso da simulação como apoio nas decisões sobre a capacidade total necessária a uma planta, requerimentos de tamanho de *buffer* e a visualização dos efeitos no fluxo após a modificação da planta. NYMON (1987) sugere o uso da simulação para guiar o desenho dos processos preferencialmente. Enfim aplicações que usem os resultados da simulação para estimar as implicações de custos e examinar o impacto na estratégia da manufatura.

SALIBY (1989) afirma que a principal vantagem que a simulação tem a oferecer é sua grande flexibilidade, pois se aplica aos mais variados problemas, como por exemplo:

- simulação de sistemas de atendimento (filas), tais como a operação de um terminal portuário, de uma central telefônica e outros serviços de atendimento ao público;
- simulação de um sistema de estoques e compras, para determinar uma melhor política de operação;
- simulações financeiras, estudando o fluxo de caixa e demais resultados econômico-financeiros de uma empresa ou projeto de investimento;
- simulação de sistemas macroeconômicos, tais como um modelo econômico demográfico, um modelo econométrico ou um sistema previdenciário;
- simulação de sistemas de transporte público, tais como, a operação de uma frota de ônibus urbanos ou trens de um metrô;
- simulação de operações militares, tais como, estudos logísticos e estratégias.

2.8.6 - O Uso da Simulação para o Estudo de Gargalos

Em técnicas de simulação de sistemas de manufatura é importante direcionar-se para problemas a serem superados quando se procura prover soluções para situações reais. A definição dos objetivos para a construção do modelo, validação e análise de dados podem ser melhor apontados e compreendidos com o uso da simulação. Há muitos anos têm aparecido muitas ferramentas baseadas em simulação inclusive para operadores iniciantes em simulação com a condução do estudo da simulação com maior confiabilidade. Estes *softwares* com ferramentas de apoio auxiliam no desenvolvimento de um modelo geral e na análise na escala de tempos, mas problemas igualmente sérios podem ser negligenciados devido à inexperiência de seus operadores (LAW e KELTON, 1991).

Os autores BYRNE (1992) e BYRNE e JACKSON (1994) demonstram o uso da simulação para o estudo de gargalos em processos de manufatura na programação da produção em conjunto com o uso integrado dos conceitos de OPT, ao examinarem os algoritmos gerados durante a programação de produção em setores produtivos com recursos gargalos, pode-se determinar com um alto grau de confiabilidade as restrições do processo.

Os autores O’KANE, SPENCELEY e TAYLOR (2000) descrevem a simulação como ferramenta essencial para problemas em tecnologia de manufaturas avançadas, destacam a modelagem e a simulação como uma das mais populares técnicas empregadas para análise de sistemas complexos de manufatura e fazem o uso delas com objetivos de investigar: o fluxo de produção, rotinas e recursos, a utilização de máquinas (com o respectivo aumento ou diminuição de máquinas) e gargalos em processos de produção, entre outros.

2.8.7 - Teoria das Restrições

Nesse item apresentam-se definições relacionadas ao termo “restrições”, procura-se identificar o seu uso como ferramenta de auxílio no processo de detecção de gargalos.

Uma restrição conforme indicado pelo termo trata-se de qualquer recurso que limita um sistema em atingir maior desempenho em relação à sua meta (GOLDRATT, 1991). Apresenta-se em várias formas: físicas, como uma máquina com baixa capacidade produtiva, número de recursos humanos abaixo do ideal, demanda de mercado; ou não-físicas, como restrições derivadas de políticas adotadas pela empresa, posturas comportamentais, cultura da empresa.

CORBETT NETO (1997) sugere a TOC⁵ como uma das grandes revoluções na administração. MABIN & BALDERSTONE (1999), por sua vez, publicaram um estudo independente, com o resultado obtido por uma amostra de empresas que tinham usado e aplicado os conceitos da TOC. Alguns dos resultados são os seguintes:

1. 70% de redução média do tempo de *lead-time*;
2. 44% de índice médio de melhoria na pontualidade de entrega;
3. 63% de aumento médio de faturamento e lucro;
4. 65% de redução média do tempo de ciclo;
5. 49% de redução de níveis de inventário;

Em sua metodologia chamada “Processos de Raciocínio da Teoria das Restrições”, Goldratt coloca cinco passos lógicos para condução do processo decisório (conforme descrito no item 1.4). Basicamente a TOC procura responder a três questões: (“O que mudar?”, “Para o quê mudar?” e “Como mudar?”); fazem uso de algumas ferramentas, nesse ponto o uso da simulação pode auxiliar na procura de respostas para as questões acima, pois, a simulação nos permite efetuar perguntas, como por exemplo: “O que ocorre se...” (CHWIF e MEDINA, 2006).

2.8.8 – *Softwares* de Mercado que trabalham com Simulação

Alguns *softwares* de simulação no mercado já incorporam em seus produtos recursos que visam a auxiliar na detecção e na análise de gargalo em produção. É possível citar alguns fabricantes mundialmente conhecidos, tais como: AUTOMOD, TECNOMATIX – eM-Plant, PROMODEL, SIMUL8®, ARENA, SIMSCRIPT, ED, que aplicam metodologias de detecção de gargalo dentro de seus analisadores de gargalo (*Bottleneck Analyzer*).

A facilidade gráfica que esses *softwares* proporcionam auxilia nas análises, porém, se os métodos utilizados em seu desenvolvimento não considerarem todas as variáveis necessárias para uma adequada análise dos gargalos, podem comprometê-la em termos qualitativos. Como exemplo a ser citado de utilização de metodologia aplicada em um *software* analisador de gargalo eM-Plant da TECNOMATIX. Este *software* utiliza como metodologia para determinação de gargalo o conceito de recursos com maior tempo de espera em frente à máquina, conforme a figura 2.6. A comparação de tempos (espera, processamento, parada, falha, pausa) é feita por meio de gráficos de barras.

⁵

TOC – Theory of Constraints – Teoria das Restrições.

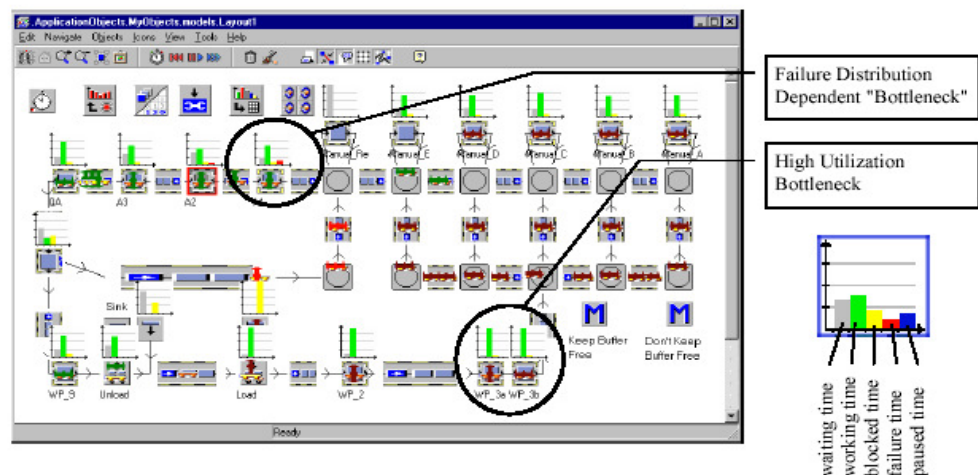


FIGURA 2.6 – TELA DO *SOFTWARE* EM-PLANT PARA DEMONSTRAÇÃO DO GARGALO DETECTADO

2.9 – FORMAS ANALÍTICAS DE DETECÇÃO DE GARGALOS

2.9.1 – Média de Tempo de Espera em Frente à Máquina ou pelo Tamanho da Fila

Dado um processo produtivo com uma distribuição dos equipamentos no “chão de fábrica” descritos conforme a figura 2.7, é demonstrado o uso do método analítico proposto por LAW e KELTON (1991) para determinação de gargalos por meio do cálculo da média de tempo de espera de cada peça (produto a ser manufaturado) em frente ao equipamento ou pelo tamanho da fila. Isso permite determinar, para cada fluxo de processo, o gargalo pertencente ao processo de confecção do produto.

Para exemplificar a aplicação foram coletados os dados de processo de uma determinada empresa que pretendia efetuar a aquisição de um novo equipamento.

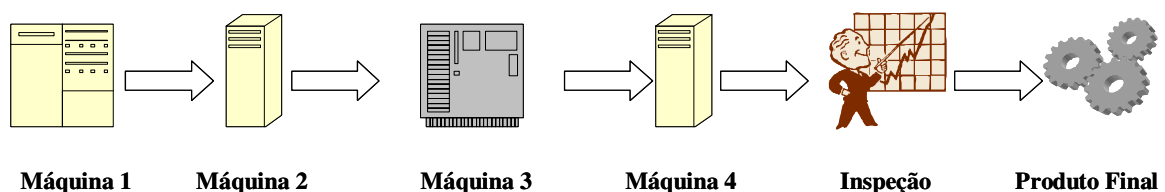


FIGURA 2.7 – REPRESENTAÇÃO DE UM PROCESSO PRODUTIVO

O objetivo era determinar se existia uma real necessidade de aquisição de mais um novo equipamento para auxiliar na execução das atividades da máquina M4. Acreditava-se que, pelo fato do produto fabricado possuir uma grande quantidade de estoque em processo WIP na máquina M4 durante toda sua etapa de operação, esta seja considerada o gargalo desse processo, levava, por isso, a uma análise intuitiva e primária da existência de restrição

na máquina M4. Após o levantamento de todos os dados dos processos e aplicação do método, chegou-se aos seguintes números, conforme demonstrado na tabela 2.1:

A tabela 2.1 mostra as características do processo (Produto: Engrenagem, Característica das Filas: M (exponencial) e Disciplina da Fila: FIFO), o equipamento que possui o maior tamanho médio de fila é a máquina M1, a qual também possui o maior tempo de espera em fila, portanto, contraria as expectativas iniciais de que a máquina M4 fosse o equipamento gargalo do processo, os dados constantes na tabela demonstraram que a máquina M1 é o gargalo.

Considerando-se que não existem outros produtos ou outras configurações de programação da produção, esta restrição pode ser considerada como um gargalo simples do sistema.

TABELA 2.1 – TABELA DE DADOS DO PROCESSO DE MANUFATURA DA ENGRENAGEM

<i>EQUIPAMENTO</i>	<i>CHEGADAS /MIN λ</i>	<i>OPERAÇÃO/MIN μ</i>	<i>NÚM. ESPER. DE CHEGADAS $\rho = \lambda / \mu$</i>	<i>TAMANHO MÉDIO DA FILA ($L = \rho /$ $1 - \rho$)</i>	<i>TEMPO DE ESPERA EM FILA ($W = 1 / \mu -$ λ)</i>
M1	45	46	0,978	44,45	1
M2	28	30	0,933	13,92	0,5
M3	40	45	0,888	7,92	0,2
M4	30	32	0,937	14,87	0,5
INSPEÇÃO	30	36	0,833	4,997	0,16

2.9.2 – Medição de Gargalos Flutuantes

LAWRENCE e BUSS (1994) demonstram que toda mudança de gargalo é resultado das variações randômicas no “chão de fábrica”. Para isso, usam uma medida escalar de flutuação de gargalo baseada na capacidade de utilização dos centros de trabalhos e na probabilidade do centro de trabalho ser um gargalo. O gargalo, neste caso, é definido como o centro de trabalho que tem o maior número de tarefas aguardando em fila, o maior em proporção no tempo. Segundo MOSS e BIN YU (1999), a conclusão de LAWRENCE e BUSS (1994) de que o melhor caminho para eliminar gargalos flutuantes é adicionar capacidade para os centros de trabalho não-restritivos é válida; pois isto aumentará a probabilidade de um centro de trabalho específico ser o gargalo. LAWRENCE e BUSS (1994) definem a flutuação como:

$$\beta = 1 - (cv / \sqrt{n}) \quad (1)$$

Nesta equação,

cv = coeficiente de variação de gargalos inclusos na probabilidade de n centros de trabalho

n = número total de centros de trabalho

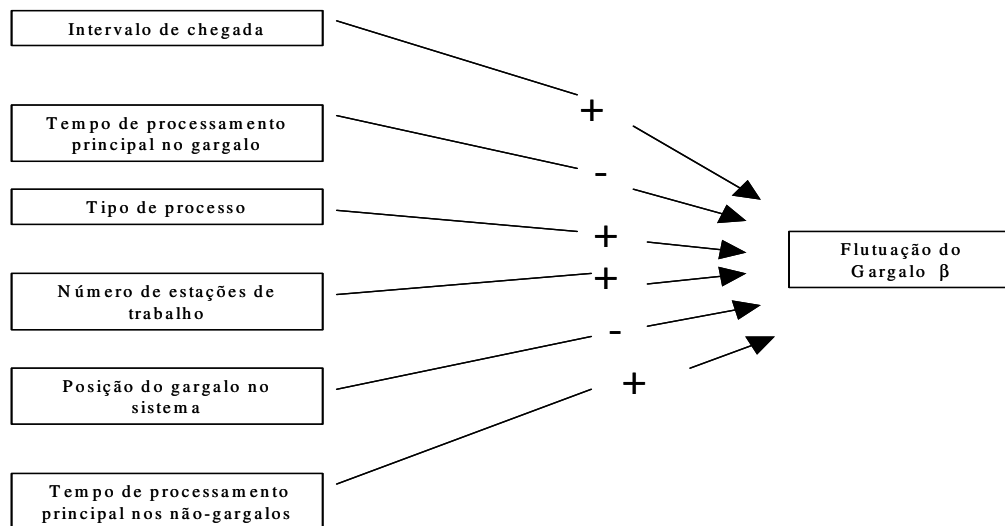
Se o processo é perfeito e tem um gargalo constante, então β será igual a zero. Se todos os centros de trabalho têm uma igual probabilidade de serem o gargalo, β será 1 (e o processo torna-se difícil de gerenciar e os gargalos flutuam muito mais). Neste estudo, MOSS e BIN YU (1999) querem investigar a influência dos parâmetros do processo para medir β na fórmula para filas de *Little*, relatando o tempo de fluxo de sistemas e intervalos de chegada de tarefas para um número total de tarefas no sistema. Sendo N o número médio de tarefas (produtos em processo, WIP) no sistema; λ a média de intervalos de chegada, e F o tempo de fluxo principal do total de fluxos ordenados do sistema, pode-se apenas, segundo MOSS e BIN YU (1999), usar o relacionamento entre a utilização e os intervalos de chegadas para determinar o tamanho do WIP.

$$N = \lambda - F \quad (2)$$

$$\rho = \lambda / \mu \quad (3)$$

Sendo que ρ é o índice de utilização; λ é novamente a média de intervalos de chegada, e μ é o tempo de processamento principal. Então, MOSS e BIN YU (1999) descrevem que o intervalo de chegada possui efeito na utilização (e, por isso, β é a flutuação do gargalo). Os mesmos autores MOSS e BIN YU (1999), usam um modelo para o estudo através da simulação para investigarem o efeito de muitos parâmetros de sistemas em β . O modelo na figura 2.8 inclui a hipótese de relacionamento entre esses parâmetros e β . Como se pode observar, o intervalo de chegada terá um efeito positivo em β . Mais frequentemente tarefas chegam para o processo, mais ordens irão ser avaliadas para o trabalho, acrescentando a utilização para todos os centros de trabalho. Com o aumento da utilização, a probabilidade de qualquer um dos centros ser o gargalo decresce, o que causará um aumento na flutuação. Também, é possível observar que o tempo de processamento para o gargalo terá um efeito

negativo no β . Como o tempo de processamento aumenta, o gargalo continuará a ser gargalo, reduzindo a flutuação. Como o tempo de processamento principal aumenta o centro de trabalho não-gargalo, estes centros de trabalho terão uma grande chance de virem a ser gargalos, existindo um relacionamento positivo entre o tempo principal de não-gargalos e β (MOSS e BIN YU, 1999).



FONTE: Moss e Bin Yu, 1999.

FIGURA 2.8 - RELACIONAMENTO ENTRE OS PARÂMETROS E β

2.9.3 – Estimação de Gargalos

MOSS e BIN YU (1999) apresentam um método analítico que prevê uma forma de estimar gargalos flutuantes a partir de certos parâmetros da manufatura. Essas flutuações foram descritas primeiramente por LAWRENCE e BUSS (1994) como um método para auxiliar gerentes a compreenderem o impacto dos gargalos em suas operações. Uma regressão linear é usada para quantificar o relacionamento entre as flutuações e intervalos de chegada, tempos de processo principal para gargalos e não-gargalos, o tipo de processo (fluxo ou lote), e a posição do gargalo no processo, onde as validações dos dados são utilizadas para confirmação do modelo. Apesar de gargalo, por si só, ser um assunto discutido no campo da pesquisa operacional, MOSS e BIN YU (1999) mostraram que existem raras referências sobre o uso de métodos analíticos para problemas com gargalos flutuantes. Exemplos recentes da “Teoria das Restrições” na literatura discutem como técnicas de programação linear são usadas para resolverem problemas de otimização de um *mix* de produtos, quando nessas

existem alternativas de rotas de processamento e, assim, permitirem a estimação de possíveis gargalos.

ADAMS (1998) descreve um procedimento heurístico para programação de gargalos em um ambiente de chão de fábrica. Por outro lado, IVENS e LAMBRECHT (1996) incluíram esse procedimento em seu artigo sobre a extensão de procedimentos heurísticos para gargalos flutuantes em aplicações reais. Enquanto, RAMUDHIN e MARIER (1996) aprofundaram o estudo do procedimento de ADAMS (1998) para diferentes tipos de processos. Em todas elas, no entanto, são descritas muitas informações relativas a gargalos flutuantes.

Todos os autores procuraram um procedimento geral para gargalos flutuantes (GSBP – *Generalized Shifting Bottleneck Procedure*) que tivesse um melhor desempenho quando existisse uma grande variedade de processos contendo várias ESTAÇÕES DE PRODUÇÃO. Porém, “quando a carga de trabalho é distribuída de forma equilibrada entre os processos, o procedimento tende a atrapalhar-se devido à existência de muitos gargalos potenciais para se considerar” (MOSS e BIN YU, 1999). Essa metodologia é pouco utilizada na indústria em função de seu alto grau de dificuldade na interpretação e na implementação em diversos processos, sendo aplicada apenas em processos muito específicos.

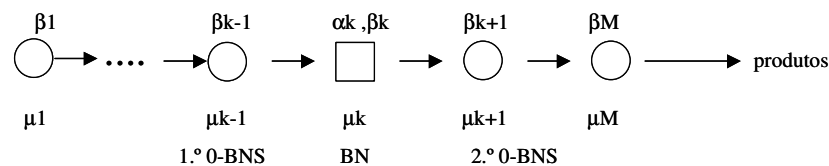
2.9.4 – O método através dos custos de Setup

GROSFELD-NIR (1995) considera como sistema de gargalo simples (SBNS) um sistema de produção com vários estágios em série dos quais todos os custos de *setup*, exceto um, é zero. O estágio que contém “não-zero” de custo de *setup* é, portanto, definido como sendo o gargalo (BN). Quando o custo primário de um produto corresponde ao *setup* e ao tempo de processamento, o gargalo pode ser considerado como um “recurso crítico” (recurso que é utilizado em sua capacidade total) em que o fluxo de entrada desse gargalo determina o fluxo total de entrada de todo o sistema, como descrito na filosofia OPT (CORRÊA e GIANESI, 1995) e (JONES e ROBERTS, 1990).

Neste caso, o *setup* desperdiçado (perdido) em um recurso não-gargalo não irá alterar de forma significativa o lucro como um todo. Portanto, todos os procedimentos de *setup* envolvidos no processo, exceto no caso do recurso crítico, podem ser negligenciados na composição de custos. Conclui-se, então, que um sistema com um recurso crítico simples pode ser modelado como um SBNS de forma exemplificada, onde GROSFELD-NIR (1995) assume alguns parâmetros na exemplificação: a produção é em lote ou partidas e envolve

custos lineares. O custo associado com o processamento do lote de tamanho N é $(\alpha + \beta N)$, os parâmetros α e β são referenciados como “custo de *setup*” e “custo variável” respectivamente.

Esta descrição aponta para um ambiente onde ordens são geradas em pequenas quantidades e produtos são fabricados por encomenda, como, por exemplo, em muitas indústrias de alta tecnologia. No contexto de demanda rígida, alguns autores, como BREJA (1997), GROSFELD-NIR (1995), GERCHAK (1990 e 1992), KLEIN (1966) e SEPHERI (1986) têm assumido o custo do *setup* como associado a cada produção. Isto é comum quando o processo está sendo executado e enquanto os produtos são inspecionados e as atividades da manufatura estão ocupadas com diversas ordens de produção.



FONTE: Grosfeld-Nir, 1995.

FIGURA 2.9 – FLUXO DE PROCESSAMENTO PARA ANÁLISE DE UM SBNS

Nesta visão de gargalo (identificado na figura 2.9 como BN), o objetivo é encontrar a (Configuração Ótima) que minimize a expectativa total de *setup* e “custos variáveis”.

2.10 –VISÕES SOBRE DETECÇÃO DE GARGALOS EM OUTRAS ÁREAS

Na área da Ciência da Computação, BLAKE e BREESE (1995) descrevem o diagnóstico e tratamento de gargalos em sistemas de computadores usando técnicas da teoria das decisões. As técnicas trazem um alto grau de confiabilidade em modelos de interação entre aplicações de carga, sistemas operacionais e sistemas de *hardware*. O desempenho de gargalos em computação é determinado tipicamente pelo alto consumo de muitos recursos de hardware ou a partir de outros recursos; geralmente, estes resultados de baixo consumo em outros recursos de *hardware* resultam em atraso, completando a carga.

Uma vez que um determinado recurso seja identificado como sendo um gargalo, uma grande possibilidade de soluções passam a existir (BLAKE, RUSSEL e BRESSE, 1995), ou seja, facilita a atuação no processo para implementar melhorias. Isto inclui distribuição de carga por meio de instantes adicionais daquele determinado recurso; instalação de recursos mais rápidos; ou o redesenho da carga de trabalho para usar em outro determinado recurso.

Estas ações resolverão o gargalo pela redução do tempo perdido e, possivelmente, aparecerá um gargalo em outro componente.

Dentro da área de engenharia de tráfego, GAZIS e HERMAN (1992) apresentaram a análise de fluxo decorrido como *Moving Bottleneck*, baseados, em parte, na hipótese de que existem muitas funcionalidades relacionadas entre o fluxo e a densidade, como na teoria de LIGHTILL e WHITHMAN (1995), que demonstra que, para um sistema de coordenadas móveis (ex.: tráfego de automóveis em uma avenida, ver figura 2.10), pode-se transformar esses gargalos móveis em um problema equivalente ao de um gargalo estacionário. Para ser preciso sobre o início ou condições limites, suponha-se que, primeiramente, para o tempo $t = 0$, veículos estejam trafegando ao longo de duas pistas unidirecionais com uma média de velocidade estacionária v_0 , densidade k_0 e fluxo q_0 .

A velocidade é assumida para serem essencialmente iguais em ambas as pistas, e o k_0 e q_0 referem-se à densidade e ao fluxo em ambas as pistas. Existe uma entrada para a avenida no ponto $x=0$, e no tempo $t=0$, onde um veículo lento ou um comboio entra na avenida trafegando a uma velocidade v^* , $v^* < v_0$. O veículo irá trafegar em uma das pistas por alguma distância arbitrariamente. Os veículos que já estão à frente do comboio no tempo $t=0$ irão continuar trafegando a uma velocidade v_0 , mas, os veículos que se encontram atrás do comboio, após estes terem entrado na pista, tentarão ultrapassá-los pela pista desbloqueada. O próprio comboio será tratado como uma obstrução móvel, mas os veículos, exceto o comboio, são assumidos para comportarem-se de acordo com algumas teorias dinâmicas propostas por LIGHTHILL e WHITHMAN (1995). Fluxos e densidades para efeito de análise de gargalos móveis passam a referir-se a “veículos não-comboio”. Imagine-se que existem vários observadores e todos trafegam a uma velocidade v^* , de várias localizações relativas ao comboio.

$$x^* = x - v^*t \quad (1)$$

Eles estarão se vendo dentro da avenida como se eles estivessem em um setor estacionário da via com apenas uma pista para os veículos não-comboio adjacentes para o comboio. Tão logo após o comboio entrar na avenida, os observadores que trafegam próximos ao comboio, deverão também ver aproximadamente o fluxo estacionário de veículos ultrapassados nesta “pista abandonada”. Existirá uma parte da avenida no sentido contrário do comboio onde os veículos irão retornar para as duas pistas, mas NEWELL (1996) assume que o fluxo passado na obstrução é ditado por qualquer um dos q_0 , ou o fluxo máximo que pode

passar em uma parte da pista; então, a parte simples da pista é o gargalo e não a parte entrelaçada.

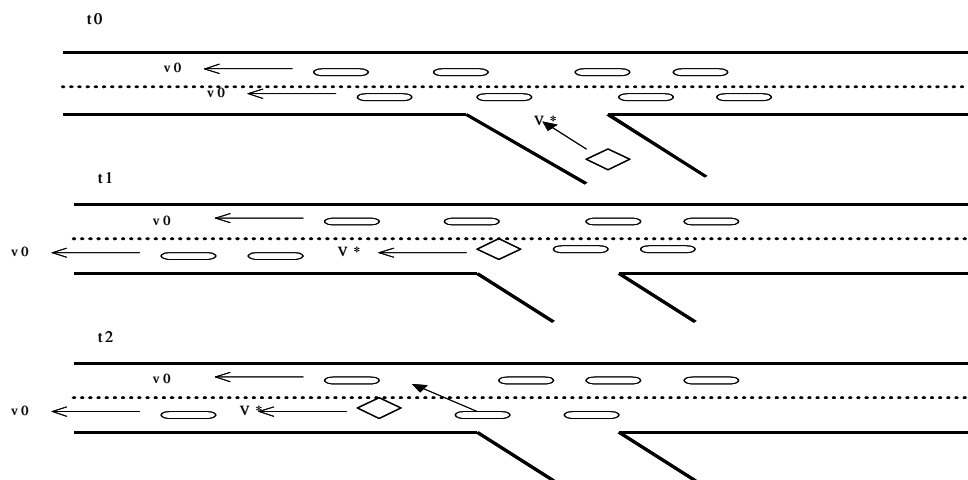


FIGURA 2.10 – INFLUÊNCIA DE UM GARGALO MÓVEL NUMA PISTA COM VEÍCULOS

3 – ANÁLISE DOS PRINCIPAIS CRITÉRIOS PARA A DETECÇÃO DO GARGALO

3.1 – O USO DE UM EXEMPLO PARA ILUSTRAR OS CRITÉRIOS ABORDADOS

Em seu artigo apresentado no 2003 Winter Simulation Conference, TANAKA, NAKANO e ROSER (2003) apresentam um exemplo de uso do método de detecção de gargalos fundamentado no percentual de utilização da máquina e do método de detecção de gargalos baseado no tempo de espera em frente à máquina, para, logo em seguida, compará-los ao método por meio de tempos ativos e não-ativos. Nesse exemplo, é usado um sistema AGV. Essa comparação servirá de baliza para o restante dos tópicos deste capítulo.

O sistema apresentado pelos autores consiste de três máquinas e três AGV's, como mostra a figura 3.1. Os três AGV's transportam as peças vindas da entrada do processo na estação IN para a primeira máquina, M1; para a segunda máquina, M2; que transporta para a terceira máquina, M3; que transporta para a estação de saída OUT. Os (AGV's) apenas transportam para a próxima estação se a próxima estação estiver livre; nesse exemplo, não existem bloqueios previstos para o AGV, cada máquina também possui dois *buffers* de capacidade, para peças processadas e não-processadas, respectivamente. Existe uma demanda e um suprimento infinito das peças para a estação de entrada e para a estação de saída sendo o tempo médio por produto gerado no sistema de 80,5s.

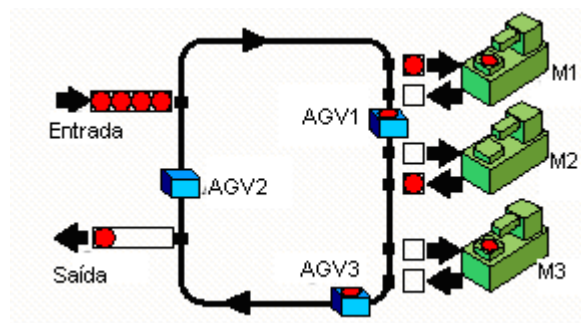


FIGURA 3.1 – SISTEMA COM AGV

A tabela 3.1 mostra os parâmetros desse sistema. Na coluna (“Tempo de Ciclo (s)”) é indicado o ciclo de tempo que cada máquina possui, na coluna (MTBF) indica a ocorrência de falhas, nesse exemplo de 10.000s, e outra coluna (MTTR) indica o tempo para reparo, nesse exemplo de 500s, ambas com distribuição exponencial negativa. A tabela 3.2 mostra a distância que o AGV tem para trafegar entre as estações e o tempo de tráfego com uma

velocidade de 500mm/s. O carregamento e o descarregamento de peças são supostamente instantâneos. A distância da máquina M3 para a estação de entrada IN inclui a parada na estação de saída OUT. A simulação executada pelos autores TANAKA, NAKANO e ROSER (2003) foi implementada com o uso do *software* GAROPS durante o período de 400 horas.

TABELA 3.1 – PARÂMETROS DAS MÁQUINAS

Máquina	Tempo de Ciclo (s)	MTBF (s)	MTTR (s)
M1	55	10.000	500
M2	60	10.000	500
M3	40	10.000	500

FONTE: Tanaka, Nakano e Roser, 2003.

TABELA 3.2 – TRÁFEGO DO AGV

De	Para	Distância(mm)	Tempo(s)
Entrada	M1	34.650	69,3
M1	M2	6.050	12,1
M2	M3	6.050	12,1
M3	Entrada	32.700	65,4

FONTE: Tanaka, Nakano e Roser, 2003.

3.2 – ABORDAGEM ATRAVÉS DO CRITÉRIO BASEADO NO PERCENTUAL DE UTILIZAÇÃO

Para detectar o gargalo, mede-se o percentual de utilização do tempo de uma máquina ou AGV ativo, e, então, define-se a máquina que possua o maior percentual de utilização como sendo o gargalo. Para o exemplo da figura 3.1, a utilização de diferentes máquinas e AGV's foi medida. Os tempos de trabalho e os tempos de reparos também restringem o sistema: o método de utilização usa a combinação de percentual de tempos de trabalho e percentual de tempos de reparos, os quais resultam em um percentual de tempo de máquina ou AGV ativo, como mostrado na tabela 3.3.

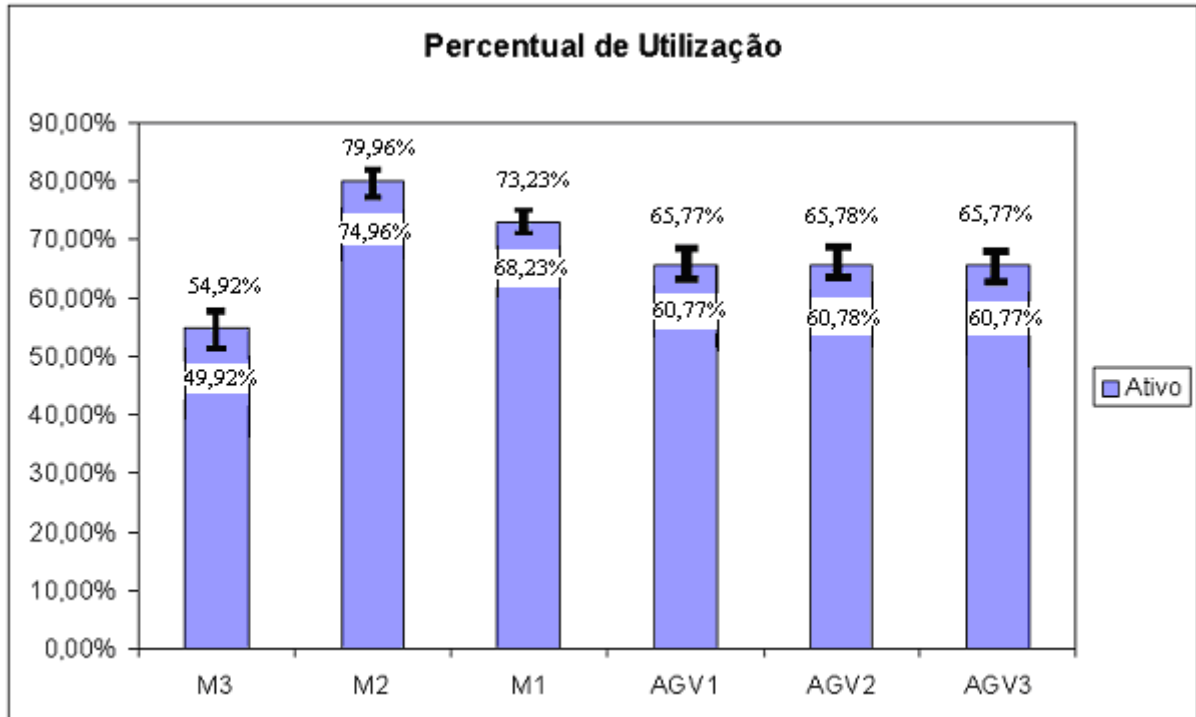
TABELA 3.3 – PERCENTUAL DE UTILIZAÇÃO DAS MÁQUINAS

Equipamento	Processando	Reparo	Ativo
M3	49,68%	5,24%	54,92%
M2	74,52%	5,44%	79,96%
M1	68,31%	4,91%	73,23%
AGV1	65,77%	-	65,77%
AGV2	65,78%	-	65,78%
AGV3	65,77%	-	65,77%

FONTE: Tanaka, Nakano e Roser, 2003

A medida de utilização ativa do sistema é também mostrada na figura 3.2, dentro de um intervalo de confiança de 95%. Pode ser claramente visto que, de acordo com o dado

medido, a máquina M2 possui altos percentuais de utilização, 80 % (inclusive com os tempos de trabalho e reparos) e, portanto, será o gargalo primário, de acordo com método de utilização. A máquina M1 tem o segundo maior percentual de utilização, 73%. O terceiro maior índice de utilização é encontrado identicamente nos três AGV's, que têm um percentual de utilização de 66%. Finalmente, a máquina M3 tem o menor percentual de utilização, 55%, conforme a figura 3.2:



FONTE: Tanaka, Nakano e Roser, 2003.

FIGURA 3.2 – GRÁFICO DE PERCENTUAIS DE UTILIZAÇÃO

Como a máquina M2 tem o maior percentual de utilização, ela será o gargalo primário, de acordo com o método de utilização. Devido aos intervalos de confiança de M2 e M1 não se sobreporem, é possível afirmar com segurança que a máquina M2 é o gargalo primário do processo (o percentual de utilização inferior da máquina M2 é maior do que os percentuais de utilização superior das demais máquinas).

Similarmente, a máquina M1 também não possui nenhum intervalo de confiança sobreposto com outras máquinas e tem o segundo maior percentual de utilização. No entanto, é difícil dizer se a máquina M1 é um gargalo secundário, em função das demais máquinas e do AGV possuírem percentuais muito próximos aos da máquina M1. Por outro lado, torna-se difícil afirmar se a máquina M3 é um não-gargalo, pelo simples fato de possuir o menor percentual de utilização, pois os intervalos de percentual, apesar de não se sobreporem dentro do intervalo de confiança, estão muito próximos.

Observa-se que o método de detecção de gargalo empregando o critério do percentual de utilização embora determine a máquina M2 como gargalo primário, não consegue discriminar com segurança nas demais máquinas quem são os gargalos secundários⁶ e quem não são gargalos.

3.3 – ABORDAGEM ATRAVÉS DO CRITÉRIO DE TEMPO DE ESPERA NA FILA EM FRENTE À MÁQUINA OU PELO TAMANHO DA FILA

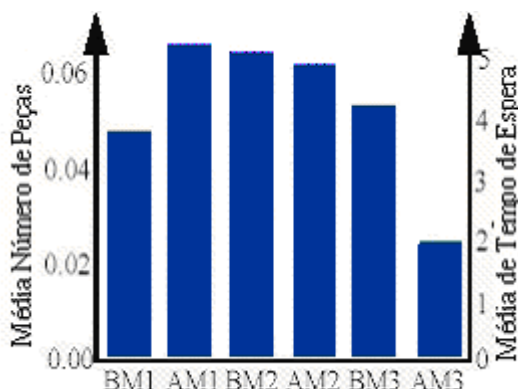
Esse método usa o tempo de espera em uma fila em frente à máquina para determinar o gargalo. Verifica a máquina em que as peças têm de esperar por maior tempo e define o gargalo de acordo com o tamanho da fila. Um método alternativo talvez seja observar a maior fila ao invés de o maior tempo de espera, no entanto, essa abordagem, segundo TANAKA, NAKANO e ROSER (2001), TANAKA, NAKANO e ROSER (2002) e TANAKA, NAKANO e ROSER (2003), trabalha apenas com sistemas lineares contendo apenas um tipo de peça. Se existirem múltiplos tipos de peças, podem existir ocasiões em que uma máquina que possua poucas peças processe lentamente e restrinja o sistema mais do que uma máquina com um maior número de peças que processem rapidamente. Nesse caso, recomenda-se usar o critério de tempo de espera ao invés do critério de tamanho da fila.

No entanto, ainda segundo TANAKA, NAKANO e ROSER (2002) existem duas limitações adicionais para se usar a detecção de gargalo pelo tempo de espera. Primeiro, os *buffers* deverão ter uma capacidade infinita, pois, senão, a detecção de gargalo usando o tempo de espera em uma fila será dificultada se a capacidade da fila for limitada (no exemplo, os *buffers* são de apenas uma peça). Segundo, é quando a demanda do sistema exceder a sua capacidade ao longo do processamento, gerando, assim, uma fila permanente que tende ao infinito. Então, nesses dois casos, inviabilizam a aplicação desses critérios. Enquanto o critério pelo tempo de espera na fila pode ainda ser medido mesmo com dificuldades, os resultados não serão utilizados. Pode-se considerar o sistema AGV como sendo um tipo de fila, apesar de não possuir um tamanho de fila ou tempo de espera na forma tradicional.

A medição do tempo de espera e a medição pelo tamanho de fila são mostradas na figura 3.3, para todos os *buffers* antes e depois das máquinas, onde “A” indica antes e “D” indicará depois. No exemplo, o *buffer* AM2 é antes e o DM2 é depois da máquina M2 e isso muda, pois os *buffers* esvaziam o tempo todo. Para *buffers* de capacidade de 1 peça apenas,

⁶ Gargalos secundários são gargalos potenciais a serem gargalos primários do processo, quando o gargalo primário for reduzido ou eliminado, ou são gargalos que podem sofrer flutuações com o gargalo primário quando existem processos com gargalos flutuantes.

existe uma média de apenas 0,05 peças em “estado de espera”, ou um equivalente em tempo de espera de apenas 4s. Além disso, todos os *buffers* possuem aproximadamente a mesma fração de peças como tamanho de fila, portanto, de acordo com as limitações do método de tempo de espera ou tamanho da fila, os resultados obtidos não podem ser usados para detectar o gargalo. Por sua vez, o método nem pode determinar o primeiro gargalo assim como nem mesmo o secundário e os não-gargalos.



FONTE: Tanaka, Nakano e Roser, 2003.

FIGURA 3.3 – TAMANHO DA FILA OU TEMPO DE ESPERA

3.4 – ABORDAGEM ATRAVÉS DO CRITÉRIO DE PERÍODOS ATIVOS E NÃO ATIVOS

Neste tópico, detalhar-se-á melhor o método proposto por TANAKA, NAKANO e ROSER nas três obras aqui estudadas (2001, 2002, 2003). Os tópicos 3.1 e 3.2 demonstram que o método de detecção de gargalos por tempo de espera na fila ou tamanho da fila e pelo método de detecção pelo percentual de utilização das máquinas nem sempre proporcionam o grau de confiabilidade desejado para algumas aplicações. Por isso, no tópico 3.3, será abordado o mesmo exemplo de aplicação do método utilizando-se um sistema AGV, descrito na figura 3.1, com o intuito de evidenciar se o uso do método proposto pelos autores confere um maior grau de confiabilidade do que os outros dois métodos descritos.

Na primeira obra de TANAKA, NAKANO e ROSER em 2001, os autores demonstraram um critério não-analítico para a detecção de gargalos que pode ser aplicado em sistemas de eventos discretos, que consistem de uma ou mais máquinas. No mínimo, uma destas máquinas é o gargalo do sistema. Como o presente método é desenvolvido para sistemas de eventos discretos, é necessário que todas estas máquinas estejam, em determinado instante, em uma ou outra lista de possibilidades de estados discretos conforme exemplo na tabela 3.4. Uma “máquina-operatriz”, por exemplo, pode estar: trabalhando, aguardando, em

manutenção, trocando ferramentas ou iniciando uma parada. Um AGV pode estar: aguardando, movendo para um local de carga ou para um local de descarga ou iniciando uma manutenção. Para aplicar o método, apenas uma lista das atividades do sistema é necessária para cada máquina, sendo que seu *status* poderá modificar-se ao longo do tempo.

TABELA 3.4 – TABELA DE ESTADOS ATIVOS E NÃO ATIVOS PARA DIFERENTES MÁQUINAS

Máquina	Ativa	Não-Ativa (Inativa)
Máquina operatriz	Em serviço, Em manutenção, Troca de ferramentas	Espera de uma peça, Espera de um serviço, Bloqueada
AGV	Movimentação de carga, Movimentação de descarga, Início de um reparo	Aguardando, Em movimento para uma área de espera
Mão-de-obra ⁷	Em Trabalho	Aguardando
Máquina alimentadora	Obtendo nova peça	Bloqueada
Máquina extratora	Removendo nova peça	Aguardando
Computador	Calculando	Parado
Telefonista ⁸	Atendendo a um consumidor	Aguardando

FONTE: Tanaka, Nakano e Roser, 2001.

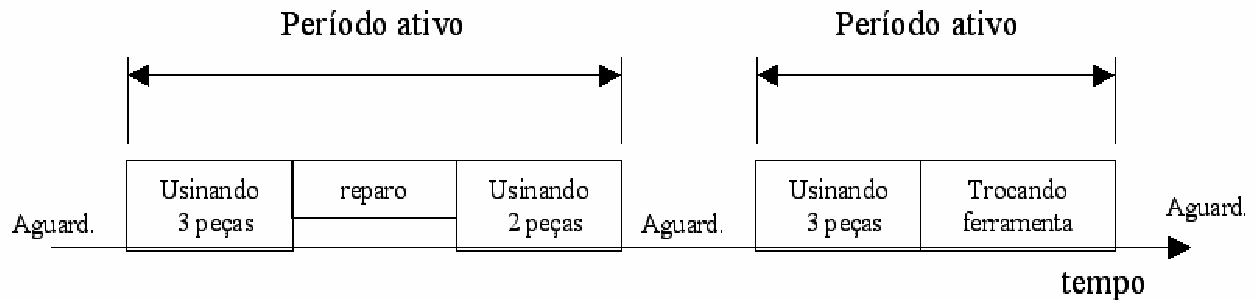
Em geral, essa é uma abordagem padrão para muitas simulações e muitos processos de sistemas para monitoramento de processos. Nenhuma informação adicional sobre a estrutura do sistema é necessária, subseqüentemente, o método é muito fácil de ser implementado em muitas ferramentas de *software*. TANAKA, NAKANO e ROSER (2001) descrevem, como primeiro passo, a necessidade de agrupar todos os “estados” possíveis em dois grupos: iniciando em “estados ativos” e “estados inativos”. O estado é inativo se a máquina associada nele está aguardando (*waiting*) a chegada de peças ou serviços ou carga de trabalho da máquina. No entanto, no presente método, não é medido o percentual, mas, sim, a duração de natureza ativa (duração na máquina em “estado ativo” sem interrupção por algum “estado inativo”).

Agora, estados ativos consecutivos são considerados como sendo um único estado ativo; por exemplo: uma máquina processando uma peça; ou iniciando um reparo; ou, então, processando uma outra peça sem interrupção — é considerado um “estado ativo”: com a

⁷ Mão-de-obra – embora colocada pelos autores na categoria máquinas, trata-se de recursos humanos, bem compreendido.

⁸ Telefonista – embora colocada pelos autores na categoria máquinas, trata-se de recursos humanos, bem compreendido.

duração da natureza de “estado ativo”, inicia-se a soma das durações dos estados de natureza ativa individual.



FONTE: Tanaka, Nakano e Roser, 2001.

FIGURA 3.4 – PERÍODOS ATIVOS DE UMA MÁQUINA DURANTE A SIMULAÇÃO

Utilizando-se da tabela 3.4 de estados ativos e não ativos, a figura 3.4 mostra o exemplo de estados ativos (trabalhando, manutenção, trocando ferramenta) e inativos (aguardando) da máquina durante o período ativo baseado nos estados ativos consecutivos.

A duração a_i de todos os períodos ativos é calculada para todas as máquinas i , dado o fluxo na simulação. Estes resultados estão nos pontos das durações A_i para cada máquina i , como mostra a equação (4). O cálculo de média da duração “ a_i ” para uma máquina “ i ”, é muito direto, como mostra a equação (5). A máquina que possuir a maior média com período ativo será considerada como gargalo. Como esta máquina é a menos provável de ser interrompida pelas outras máquinas, portanto, é com maior probabilidade para ditar todo o fluxo do sistema.

$$A_i = \{a_{i,1}, a_{i,2}, \dots, a_{i,j}, \dots, a_{i,n}\} \quad (4)$$

$$a_i = \frac{\sum_{j=1}^n a_{ij}}{n} \quad (5)$$

TANAKA, NAKANO e ROSER (2001) também descrevem benefícios adicionais de acordo com a natureza do método de detecção de gargalos, pois, usualmente, os dados de simulação não podem ser assumidos como independentes um do outro; como consequência, fica difícil calcular com um grau de confiabilidade no intervalo de simulação medido.

Subseqüentemente, técnicas adicionais, como por exemplo, os processamentos *batch*, têm sido usadas para estabelecer um intervalo de confiança válido. Porém, os autores descrevem que resultados práticos demonstram que os tempos entre períodos inativos são

aproximadamente independentes uns dos outros, e, portanto, as médias de durações ativas também são aproximadamente independentes umas das outras, o que possibilita um cálculo direto do desvio padrão, como demonstrado na equação (6); e um intervalo de confiança, como demonstrado na equação (7). Identificado o gargalo do sistema, é possível melhorar o desempenho no gargalo e, conseqüentemente, do sistema como um todo.

$$CI_i = t_{n-1, \alpha/2} \quad (7)$$

Nesta equação,

$t_{n-1, \alpha/2}$ é o $(1-\alpha/2)$ percentil da distribuição t de Student com $n-1$ graus de liberdade;

S é o desvio padrão da amostra;

n é o número de dados da amostra.

3.4.1 – Aplicação do Critério de Tempos Ativos e Não-Ativos em Gargalos Flutuantes (*Shifting Bottleneck*)

TANAKA, NAKANO e ROSER (2002) apresentam um critério não-analítico para a detecção de gargalos flutuantes em sistemas de manufatura baseado na definição de que todos os sistemas de manufatura possuem um ou mais gargalos e, portanto, efetuar uma melhoria no gargalo significa aprimorar o sistema como um todo. Além da dificuldade de encontrar o gargalo, o sistema varia com o *mix* de produtos ao longo do tempo ou de acordo com eventos randômicos e, conseqüentemente, o gargalo pode flutuar de uma máquina para outra.

O método de detecção de gargalos flutuantes determina o gargalo baseado na duração da máquina ativa sem interrupção, comparando as durações de períodos ativos de diferentes máquinas. Se a análise for baseada nos dados de simulação ou no histórico de dados, é possível discriminar as durações de todos os períodos ativos para todas as máquinas. No entanto, segundo TANAKA, NAKANO e ROSER (2002) se a análise é usada para monitoramento em tempo real, eventos futuros são desconhecidos e as durações dos períodos ativos são conhecidas apenas em tempo real. Neste caso, a duração ativa é medida em tempo real a qual pode ser mudada a qualquer momento caso chegue uma nova informação.

Para os autores, a idéia essencial desse método é a de que, para qualquer instante de tempo, a máquina que contém a mais longa duração de período ativo sem interrupção será o gargalo transitório deste próprio tempo e as sobreposições de períodos ativos entre os gargalos anteriores e os gargalos posteriores representam a flutuação do gargalo de uma

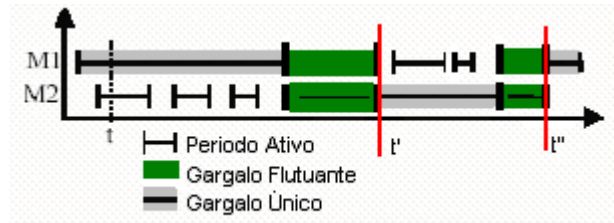
máquina para outra. Em um sistema produtivo interconectado, máquinas bloqueiam e travam outras, se estiver ativa essa estará tampouco travada ou bloqueada. Por isso, a máquina com maior duração ativa sem interrupção será a máquina que causará mais bloqueios ou travas em outras máquinas no sistema produtivo. O critério descreve como determinar qual a máquina do sistema produtivo será única ou parte de um gargalo flutuante em qualquer instante de tempo 't'.

Se, no instante de tempo 't' não houver máquinas ativas, então, não existirá gargalo. Agora, se uma ou mais máquinas estiverem ativas no instante de tempo 't', a máquina com o mais longo período de tempo ativo será considerada como uma máquina de gargalo transitório e o período ativo dessa máquina será o período corrente do gargalo. Isto se faz necessário para encontrar a máquina gargalo antes e depois do período corrente do gargalo. A máquina gargalo anterior é a máquina com o mais longo período ativo justamente antes de iniciar o período gargalo corrente. Similarmente, o gargalo posterior é a máquina com o mais longo período ativo após o término do gargalo corrente.

A flutuação de um gargalo ocorre durante a sobreposição do gargalo anterior com o gargalo corrente. Durante as sobreposições entre os períodos gargalos, nenhuma máquina pode ser considerada como gargalo único, ao invés disso, o gargalo flutua entre as duas máquinas. Se a máquina gargalo não está flutuando, então esta máquina é o único gargalo deste tempo. É claro que se não existem outras máquinas ativas, justamente no período corrente de gargalo anterior ou posterior, então não existe sobreposição e, conseqüentemente, não existe gargalo flutuante. Segundo TANAKA, NAKANO e ROSER (2002), usando este método é possível determinar em qualquer tempo a máquina que não é gargalo, o gargalo flutuante, ou o gargalo único. Este método permite a detecção do gargalo, onde e quando o gargalo anterior flutuou para o gargalo corrente e onde e quando o gargalo corrente está flutuante para o próximo gargalo.

A figura 3.5 ilustra a aplicação do método ao utilizar um exemplo simples, que consiste de apenas duas máquinas, mostra os períodos ativos sobre um curto espaço de tempo e a seleção do tempo (t) entre as máquinas M1 e M2 ativas. Se a máquina M1 tem o mais longo período ativo, M1 é a máquina gargalo para o tempo 't'. Como não existe máquina ativa antes do período do gargalo corrente, não existe sobreposição nem existe flutuação para iniciar o período do gargalo corrente. No entanto, ao final do período de gargalo corrente, a máquina M2 está ativa e tem o mais longo período ativo (t'). Por esse motivo, o gargalo seguinte é a máquina M2, e, durante a sobreposição entre o período do gargalo corrente e o período do gargalo subsequente, o gargalo flutua de M1 para M2. Agora, M2 é a máquina

gargalo e, similarmente, ao final do período de gargalo da M2, o gargalo flutuará de volta para M1 (t'').



FONTE: Tanaka, Nakano e Roser, 2002.

FIGURA 3.5 – GARGALOS FLUTUANTES

Durante o processamento é possível demonstrar em que tempo a máquina é gargalo, quando o gargalo é flutuante, e quando não existe nenhum gargalo. Por isso, é possível, segundo os autores, monitorar e detectar o gargalo em todos os tempos. Em muitos casos, talvez seja interessante não investigar em um determinado instante de tempo, mas em um período de tempo. Para determinar o gargalo durante o período de tempo, os dados são avaliados e analisados, e os gargalos transitórios são determinados sobre um período de tempo selecionado. A porcentagem de máquinas sendo gargalo único ou sendo gargalo flutuante foi medida sobre o período de tempo conforme demonstrado na figura 3.6. A máquina contendo a maior porcentagem provocará efeito de alta na respectiva máquina, diminuindo ou parando o sistema. M1 é considerado gargalo único mais do que M2; isto também envolve um número de operações flutuantes. M2 é uma pequena restrição, o gargalo secundário, tendo sido o gargalo único por uma pequena porcentagem de tempo.

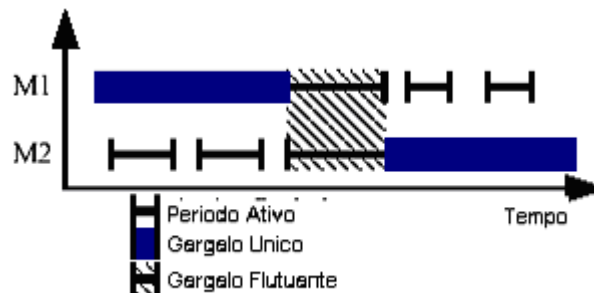
3.4.2 – Aplicação do Critério de Tempos Ativos e Não-Ativos no exemplo do sistema AGV.

O método de detecção de gargalos flutuantes também investiga quando a máquina está ativa ou não. No entanto, enquanto o método pelo percentual de utilização determina o percentual de tempo em que a máquina está ativa, o método de detecção de gargalo flutuante proposto por TANAKA, NAKANO e ROSER (2001) determina a duração em que a máquina está ativa sem interrupção. Com esse método, é possível entender melhor as restrições dentro do sistema e, portanto, ter um maior grau de confiabilidade.

O método tem sido implementado para detectar gargalos em qualquer instante do tempo, pela pesquisa da máquina ou AGV, com o mais longo período ativo no tempo. O

método determina os períodos durante o tempo em que a máquina ou o AGV está ativo sem interrupção. O termo “ativo” inclui não apenas máquinas em serviço ou AGV's em transporte, mas também períodos de quebras, troca de ferramentas ou recargas de tempos, conforme descritos nos itens anteriores. Nesse exemplo, qualquer máquina ou AGV restringe o sistema e os períodos ativos são ocasionalmente interrompidos pelos períodos inativos, nos quais a máquina ou o AGV tem de aguardar para complementar o processo de outra máquina ou AGV, como no exemplo, quando a máquina é bloqueada ou interrompida.

A idéia consiste em que, a qualquer tempo, a máquina que possua o mais longo período ativo seja o gargalo e todo sistema seja restringido por ela. O método procura distinguir entre gargalos flutuantes, em que o período ativo de um gargalo sobrepõe-se ao período ativo de outro gargalo, e gargalos únicos, em que o gargalo corrente não se sobrepõe a outros gargalos (anteriores e posteriores).



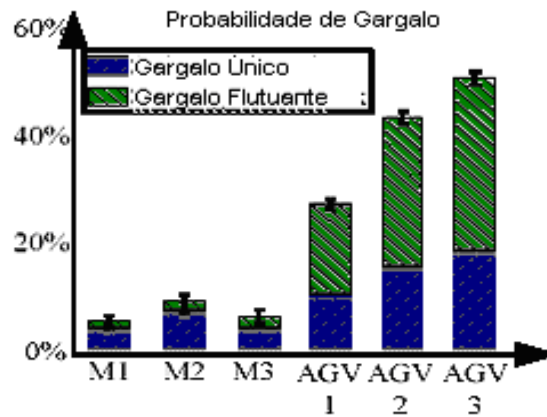
FONTE: Tanaka, Nakano e Roser, 2003.

FIGURA 3.6 – GARGALOS FLUTUANTES- O GARGALO ÚNICO

A figura 3.6 ilustra o exemplo de um sistema de duas máquinas em que o início da máquina M1 tem o maior período ativo, e, portanto, é o gargalo único. A probabilidade de uma máquina ser o gargalo pode ser medida facilmente pela determinação do percentual de tempo que a máquina é o gargalo único ou o gargalo flutuante.

No sistema AGV observa-se que, ao utilizar o método de detecção de gargalos flutuantes, como mostrado na figura 3.7, obtém-se mais gargalos diferentes do que quando se usa a abordagem através do critério de tempo de espera na fila em frente à máquina ou pelo tamanho da fila ou mesmo pelo critério de percentual de utilização. De acordo com o método de detecção de gargalos flutuantes, o gargalo primário é o sistema AGV, com cada AGV com um total de probabilidade de ser o gargalo entre 25% e 50 %, enquanto as máquinas com uma probabilidade de ser gargalo menor do que 10%. Portanto, os AGV's são gargalos primários. As máquinas são gargalos secundários e o sistema não possui nenhum não gargalo. No exemplo, a probabilidade de se ter gargalo nos três AGV's é diferente para a estrutura do

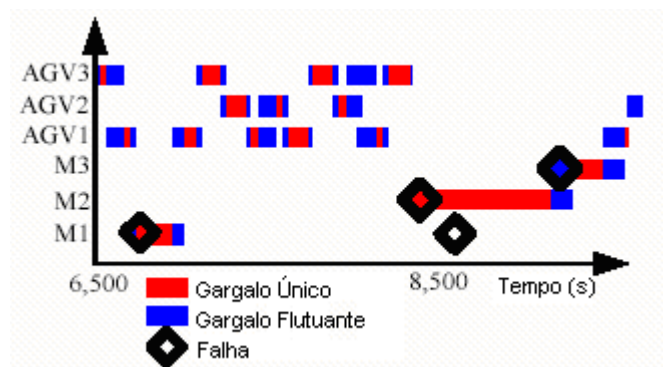
sistema. Como os três AGV's sempre demonstram a mesma rota em muitas ordens sem sobrepor umas às outras, o último AGV, nesse sistema em particular, será sempre mais provável a ser o gargalo do que o primeiro AGV.



FONTE: Tanaka, Nakano e Roser, 2003.

FIGURA 3.7 – PROBABILIDADE DE GARGALOS FLUTUANTES

A figura 3.8 mostra o gráfico de gargalos únicos e flutuantes para o sistema do exemplo e os tempos de falhas das diferentes máquinas. É possível ver claramente que, em todo tempo, a máquina gargalo é a que gerou falha e torna-se logo em seguida o gargalo do sistema. Apesar da figura 3.8 demonstrar apenas parte do tempo da simulação, esse comportamento se mantém ao longo de todo o período.



FONTE: Tanaka, Nakano e Roser, 2003.

FIGURA 3.8 – GARGALOS E FALHAS DE MÁQUINA

Pode-se concluir que a análise de gargalos flutuantes usando o método de detecção de gargalos flutuantes não apenas detecta o gargalo com confiabilidade como também demonstra com clareza as causas dos gargalos, pela investigação de gargalos temporários e suas relações nos diferentes eventos do sistema.

3.5 – TESTE DE SENSIBILIDADE PARA AUXILIAR NA COMPARAÇÃO ENTRE OS MÉTODOS ABORDADOS

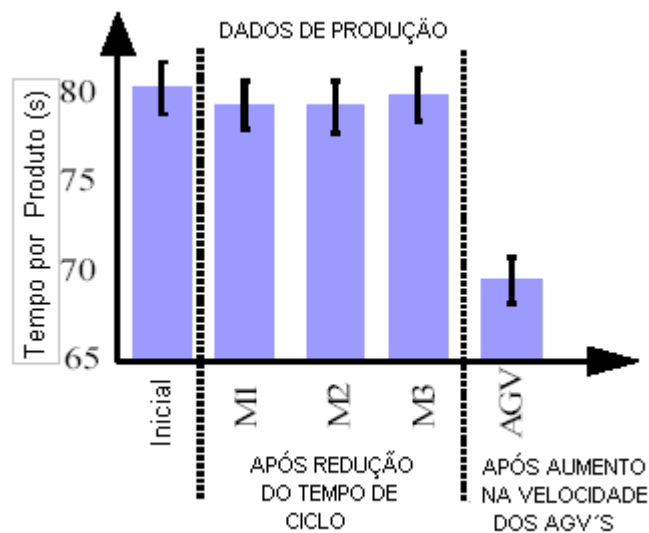
No mesmo artigo apresentado no 2003 Winter Simulation Conference, TANAKA, NAKANO e ROSER (2003) efetuaram uma experimentação para auxiliar na comparação entre os métodos. Foi incrementada independentemente mais velocidade no processamento das máquinas e AGV's, conforme demonstrado na tabela 3.5.

TABELA 3.5 – TABELA DE INCREMENTO NO SISTEMA

Máquina	Original	Incrementado	Tempo por Produto Antes do Incremento	Tempo por Produto Após o Incremento
Ciclo M1	55s	30s	80,5s	79,6s
Ciclo M2	60s	40s	80,5s	79,5s
Ciclo M3	40s	20s	80,5s	80,3s
AGV's	500 mm/s	1000 mm/s	80,5s	69,5s

FONTE: Tanaka, Nakano e Roser, 2003.

Foram efetuadas várias replicações de simulação (incrementou-se a melhoria individualmente em cada máquina), os resultados foram formatados e geram um gráfico com os dados de produção conforme a figura 3.9 e uma tabela de sensibilidade das máquinas e AGV's conforme a tabela 3.6.



FONTE: Tanaka, Nakano e Roser, 2003.

FIGURA 3.9 – DADOS DE PRODUÇÃO – COMPARATIVO APÓS INCREMENTO

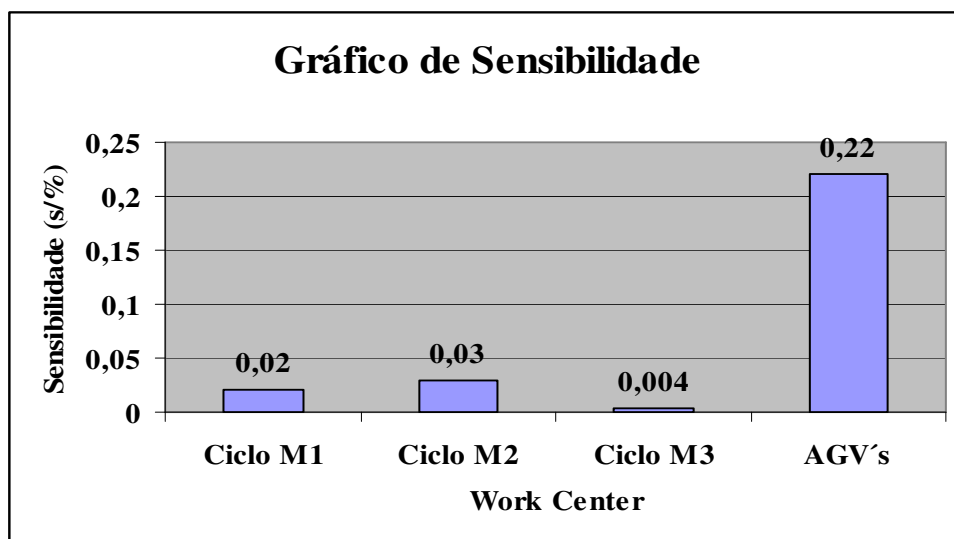
É demonstrado na figura 3.10 a sensibilidade por máquina para melhor visualização do ganho obtido após incremento no sistema. Pode-se notar no gráfico de dados de produção da figura 3.9 que existe sobreposição dentro dos intervalos de confiabilidade de 95% para as

máquinas M1, M2 e M3, demonstrando que não houve um ganho significativo no tempo por produto, porém nos AGV's após o incremento de velocidade houve uma redução significativa no tempo por produto, reforçando a indicação de gargalo feita pelo método de gargalos flutuantes para tempos ativos e não-ativos. Como a teoria nos diz que para se obter ganho no processo é necessário incrementar melhorias apenas no gargalo, para se obter ganho nesse sistema bastou apenas incrementar melhoria nos AGV's.

TABELA 3.6 – TABELA DE SENSIBILIDADE DAS MÁQUINAS

Máquina	Incremento na Máquina	Ganho no Sistema	Sensibilidade (s / %)
Ciclo M1	45%	0,90s	0,020
Ciclo M2	33%	1,00s	0,030
Ciclo M3	50%	0,20	0,004
AGV's	50%	11,00s	0,220

FONTE: Tanaka, Nakano e Roser, 2003.



FONTE: Tanaka, Nakano e Roser, 2003.

FIGURA 3.10 – COMPARATIVO DE GANHO ATRAVÉS DO TESTE DE SENSIBILIDADE

3.6 – ANÁLISE DA TABELA COMPARATIVA ENTRE OS PRINCIPAIS MÉTODOS ABORDADOS

No final do artigo apresentado no 2003 Winter Simulation Conference, TANAKA, NAKANO e ROSER (2003) desenvolveram uma tabela comparativa entre os métodos descritos nesse trabalho utilizando-se de critérios considerados importantes por eles na análise e detecção de gargalos. Os critérios estão formatados e, para melhor compreensão da tabela, segue um descritivo de cada item:

- Acuracidade na detecção do gargalo — é determinada pelo grau de acerto na detecção do gargalo;
- Entendimento do método — é determinado pelo grau de entendimento do método, considerando desde níveis de chão de fábrica até níveis gerenciais;
- Requerimento de dados (Informações) — é determinado pelo grau de informações necessárias para a utilização do método;
- Detecção de gargalos de longa duração — é determinado pela quantidade de vezes que é possível detectar o gargalo, quando sua duração é considerada longa (período de gargalo muito próximo ao período total de estudo do sistema) na aplicação do método em diversos sistemas;
- Detecção de gargalos de média duração — é determinado pela quantidade de vezes que é possível detectar o gargalo, quando sua duração é considerada média (período de gargalo muito próximo à metade do período total de estudo do sistema) na aplicação do método em diversos sistemas;
- Detecção de gargalos de curta duração — é determinado pela quantidade de vezes que é possível detectar o gargalo, quando sua duração é considerada pequena (período de gargalo muito pequeno em relação ao período total de estudo do sistema) na aplicação do método em diversos sistemas;
- Detecção de gargalos primários — é determinado pela quantidade de vezes que é possível detectar o gargalo primário quando aplicado o método em diversos sistemas;
- Detecção de gargalos secundários — é determinado pela quantidade de vezes que é possível detectar o gargalo secundário quando aplicado o método em diversos sistemas;
- Detecção de não-gargalos — grau de facilidade na detecção de não-gargalos quando aplicado o método em diversos sistemas;
- Grau de dificuldade em Implementação — é medido pelo grau de dificuldade para se implementar o método em diversos sistemas;
- Limitações de sistema — é medido pelo número de limitações que o método exhibe quando aplicado em diversos sistemas.

TABELA 3.7 – TABELA COMPARATIVA ENTRE OS PRINCIPAIS MÉTODOS

CRITÉRIOS	% DE UTILIZAÇÃO	TEMPO DE ESPERA (TAMANHO DA FILA)	TEMPOS ATIVOS E NÃO ATIVOS (GARGALOS FLUTUANTES)
Acuracidade na detecção do gargalo	Médio	Médio	Boa
Entendimento do método	Médio	Médio	Boa
Requerimento de dados (informações)	Muitos	Poucos	Poucos
Detecção de gargalos de longa duração	Sim	Sim	Sim
Detecção de gargalos de média duração	Sim	Sim (atrasado)	Sim
Detecção de gargalos de curta duração	Não	Não	Sim
Detecção de gargalos primários	Sim	Sim	Sim
Detecção de gargalos secundários	Não	Não	Sim
Detecção de não-gargalos	Não	Não	Sim
Grau de Dificuldade em Implementação	Muito Fácil	Fácil	Médio
Limitações de sistema	Moderado	Muitos	Poucos

FONTE: Tanaka, Nakano e Roser, 2003.

Este trabalho pretende rever todos estes critérios adotados para a comparação dos métodos a serem utilizados agora num estudo de caso de um modelo de simulação de um processo real, para assim, determinar qual o melhor método para detecção de gargalos em processos de produção.

4 – APLICAÇÃO PRÁTICA DOS MÉTODOS DE DETECÇÃO ATRAVÉS DE UM ESTUDO DE CASO

4.1 – INTRODUÇÃO

Como descrito no capítulo 1, uma das propostas desse trabalho é a aplicação dos principais métodos e critérios para detecção de gargalos (método através do percentual de utilização, método através do tempo ou tamanho da fila em frente a máquina, método através de tempos ativos e não ativos e o método através de tempos ativos em gargalos flutuantes) aplicado em um modelo de simulação de um processo de envase de líquidos em uma indústria química.

O *software* de simulação computacional “SIMUL8®” foi adotado no desenvolvimento desse trabalho, por sua facilidade na obtenção dos dados necessários à aplicabilidade do método e pela maior afinidade do autor com a ferramenta, obtida durante o desenvolvimento do trabalho. Outro fator decisivo na escolha do *software* se deve a sua integração com a linguagem de programação VISUAL BASIC, o que facilitou sua aplicação em planilhas “Excel®”.

4.2 – PADRÕES PARA INTERPRETAÇÃO DOS TEMPOS ATIVOS E NÃO-ATIVOS

Esse item tem como objetivo definir o padrão de distribuição dos códigos de estado extraídos do *software* SIMUL8®, distribuindo-os em dois blocos para contabilização do tempo, o primeiro bloco é o de Tempos Ativos e o segundo bloco o de Tempos Não-Ativos, conforme tabela 4.1:

TABELA 4.1 – TABELA DE TEMPOS ATIVOS E NÃO ATIVOS

CÓD. ESTADO O	DESCRIÇÃO ESTADO (SIMUL8®)	CONDIÇÃO DO ESTADO
0	Waiting	Não Ativo (Inativo)
1	Working	Ativo
2	Blocked	Não Ativo (Inativo)
3	Change Over	Ativo
4	Stopped	Não Ativo (Inativo)

A seguir um breve descritivo de cada estado gerado pelo SIMUL8®:

- *Waiting* quando uma estação de produção aguarda a chegada e um insumo ou produto para a execução de sua atividade;

- *Working* quando uma estação de produção efetivamente executar uma atividade;
- *Blocked* quando uma estação de produção estiver impedida de iniciar sua próxima atividade por não conseguir liberar o produto manufaturado por esta para a próxima estação de produção por se encontrar ocupada ou com a fila de entrada completa;
- *Change Over* quando uma estação de produção efetua uma troca de ferramenta ou produto (*setup*);
- *Stopped* quando uma estação de produção encontra-se parada por falha no equipamento ou manutenção.

4.3 – MODELO DE SIMULAÇÃO DO PROCESSO

O estudo de caso é voltado para uma indústria química que produz compostos utilizados em veículos automotores. Os produtos finais encontram-se no seu estado líquido e são acondicionados em embalagens plásticas. O modelo descreve o processo de produção das embalagens plásticas e dos compostos químicos.

Algumas informações sobre o modelo servirão de base para a análise dos resultados gerados após a execução da simulação. Para a análise foram adotados nove produtos mais representativos⁹ e o tempo de simulação será de 171.360 minutos o que representa seis meses de produção (considerando-se os turnos e dias disponíveis para produção).

O modelo consiste basicamente de 48 estações de produção que podem ser equipamentos ou processos compostos de um ou mais equipamentos organizados para a fabricação da embalagem plástica, mistura dos líquidos e envase em uma indústria química.

4.3.1 – Informações Básicas do Processo

Como demonstrado na figura 4.1 e no modelo de simulação (figura 4.2) o fluxo do processo inicia na programação de produção das matérias-primas necessárias para a produção das embalagens plásticas e na programação de produção das matérias-primas necessárias na produção dos líquidos para posterior envase nas embalagens plásticas. O sistema de programação adotado no modelo de simulação funcionará da seguinte forma:

1. No início do mês são acordados valores de produção mensal (Previsão);
2. São geradas duas programações: (Programação para plástico e Programação para mistura).

⁹

Denominados como TOP 9 por possuírem rentabilidade maior que 65% do volume total produzido.

Depois de determinado todo o plano de programação da produção, as matérias-primas são enviadas para o processo de sopro nos equipamentos de mistura de polímeros (MISTURA1 à MISTURA9 – há um equipamento de mistura para cada tipo de produto) onde se inicia o processo de injeção e sopro das embalagens que ficam distribuídas entre as estações de produção (SOPRO1, SOPRO3, SOPRO7, SOPRO8, SOPRO9) para posterior envio via esteiras de transporte para o processo de serigrafia nas estações de produção (P100, DUBUILT5_6, SCREENER09, SERIMATIC1_2, DUBUILT5_6/ SERIMATIC1_2) que serão enviadas para estoques internos aguardando o uso posterior no processo de envase.

Em paralelo ao processo de injeção e sopro, ocorre também o processo de mistura dos líquidos que obedecem ao seu plano de programação da produção. Os líquidos que estão armazenados nas estações de produção denominadas tanques (TANQUE A, TANQUE B, TANQUE F, TANQUE V, TANQUE O, TANQUE P, TANQUE H) são enviados para reservatórios intermediários de mistura denominados (Resev Interm01_02, Resev Interm06, Resev Interm12, Resev Interm15_16, Resev Interm17_18, Resev Interm5_13_14), onde finalmente ocorre o processo de envase dos líquidos nas embalagens nas estações de produção (PROMAQ_SERAC, WADA3, P04, WADA2) e que, posteriormente, serão enviadas para o estoque de produtos acabados.

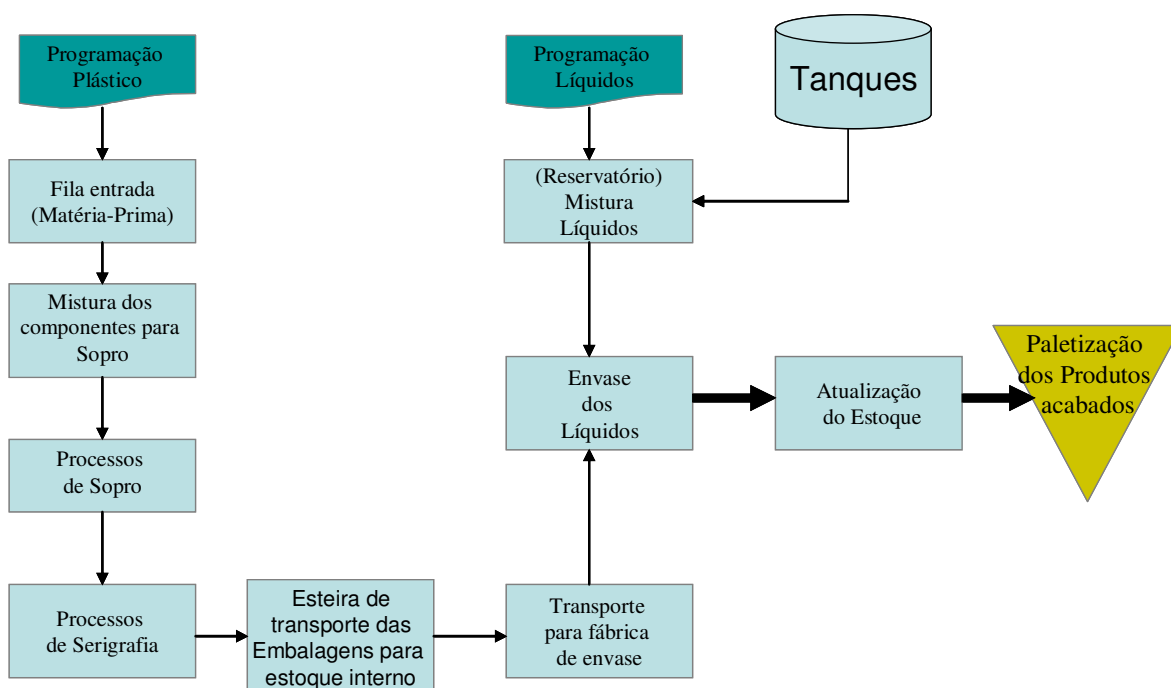


FIGURA 4.1 – MODELO DO PROCESSO UTILIZADO PELA EMPRESA

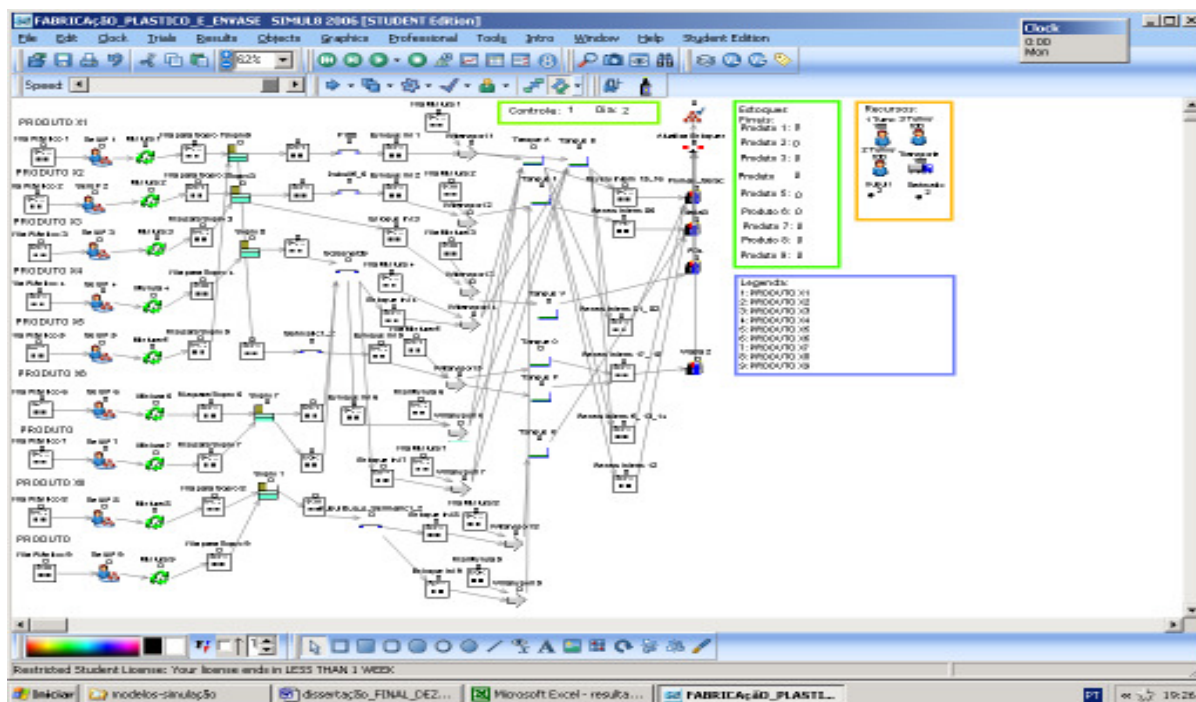


FIGURA 4.2 – MODELO DE SIMULAÇÃO DE UM PROCESSO REAL

4.3.2 – Levantamento e Consolidação dos Dados para o Modelo de Simulação Total¹⁰

Inicialmente foram efetuadas as replicações de simulação para captação das informações até um intervalo de confiança menor que 1% (para todos os índices gerados pelos métodos abordados nesse trabalho). Por questões estratégicas da empresa não serão divulgados os nomes e nem os produtos manufaturados por ela nesse modelo. Porém, todos os dados foram extraídos do seu processo real.

Os resultados gerados na execução do modelo de simulação serviram de base para análise e composição de uma tabela comparativa entre os métodos de detecção de gargalos apresentados nesse trabalho. Esses dados foram obtidos a partir dos relatórios gerados pelo SIMUL8® - RESULTS SUMMARY (consolidação dos dados nas tabelas A.1, A.2 e A.3 no (ANEXO-I)) e a partir de utilitários e de MACROS no EXCEL® (consolidação dos dados nas tabelas A.4 e A.5 no (ANEXO-I)).

As informações obtidas no RESULTS SUMMARY para geração da tabela de percentual de utilização foram extraídas do campo (% WORKING) para cada estação de produção, as informações obtidas para a tabela de tamanho de fila em frente à máquina foram extraídas no campo (AVERAGE QUEUE SIZE), para a obtenção das informações para a tabela de tempo de fila em frente à máquina foram extraídas no campo (AVERAGE

¹⁰ Modelo de Simulação Total compreende o modelo como um todo, onde todas as etapas de produção são analisadas.

QUEUING TIME). Para gerar as informações da tabela de tempos ativos o utilitário extraiu as informações do TIME SIMULATION gerados pelo SIMUL8® e para criar as informações da tabela de gargalos flutuantes o utilitário extraiu as informações de “código de estado” geradas pelo SIMUL8® a cada intervalo de tempo de simulação.

4.3.3 – Análise dos Resultados Gerados pelo Modelo de Simulação

Foi possível identificar o gargalo do processo pela análise dos resultados gerados durante o processo de simulação e consolidá-los na tabela 4.2. Em um primeiro momento comparou-se apenas qual estação de produção foi identificada como gargalo do processo pela identificação dentre as estações de produção qual possui o maior valor gerado¹¹ em relação às demais estações de produção dentro do mesmo método “destacado com um fundo diferenciado na célula da tabela”. A maioria dos métodos apontou a estação de produção SOPRO3 como gargalo primário, em destaque por um “círculo” na tabela 4.2. No entanto, o gargalo encontrado pelo método do tamanho da fila em frente à máquina diverge dos demais, pois, aponta como gargalo primário do processo a estação de produção – Wtransport5. Essa identificação deve ter sido ocasionada pelo fato do modelo de simulação não possuir *buffer* em algumas estações de produção e em outras possuir *buffer* com tamanho limitado, fatores que prejudicam a avaliação do método pelo tamanho da fila. Logo este método pode não avaliar de forma fidedigna um gargalo por suas restrições intrínsecas.

Ao aprofundar-se na análise na tabela 4.2 foi possível identificar os gargalos secundários do processo, notou-se maiores divergências entre os métodos, pois, os métodos pelo percentual de utilização, tempos ativos e tempos ativos para gargalos flutuantes convergem para a estação de produção SOPRO1, mas os métodos pelo tamanho de fila e tempo de fila divergem dos demais e entre si, onde o método pelo tamanho de fila aponta a estação de produção SOPRO3 e o método pelo tempo de fila aponta para a estação de produção Wtransport8.

¹¹ Os valores gerados em cada método são indicados da seguinte forma:
 Método através do percentual de utilização indicado em “%” - percentual;
 Método através do tamanho da fila em frente à máquina indicado em “unidades de produto”;
 Método através do tempo de fila em frente à máquina indicado em “%” – percentual (convertido tempo em % em relação ao tempo total de simulação);
 Método através dos tempos ativos e não ativos indicado em “%” – percentual (convertido o tempo em % em relação ao tempo total de simulação);
 Método através de tempos ativos em gargalos flutuantes indicado em “%” – percentual (convertido o tempo em % em relação ao tempo total de simulação).

TABELA 4.2 – TABELA COMPARATIVA ENTRE OS MÉTODOS (MODELO TOTAL COM A MÉDIA DE VALORES PARA 5 REPLICAÇÕES)

TABELA COMPARATIVA ENTRE OS MÉTODOS DE DETECÇÃO					
ESTAÇÃO DE PRODUÇÃO	% UTILIZAÇÃO	TAMANHO DE FILA (UNIDADES)	TEMPO DE FILA (%)	TEMPOS ATIVOS (%)	GARGALOS FLUTUANTES SOLE+SHIFT (%)
Mistura 1	0,00	-	-	0,00	0,00
SetUP 1	0,00	0,00	0,00	0,28	0,00
Sopro9	84,85	12,61	18,28	88,66	0,00
P100	11,85	0,02	0,05	12,46	0,00
Wtransport 1	0,63	12,43	22,09	1,47	0,00
Tanque A	9,43	-	-	10,20	0,00
Tanque B	4,91	-	-	5,75	0,00
Promag Serac	5,63	0,00	0,02	6,17	0,00
SetUP 2	0,00	0,01	0,01	0,11	0,00
Sopro3	93,08	12,67	27,07	95,80	95,66
Dubuit5_6	0,00	0,03	0,09	0,00	0,00
Wtransport 2	0,13	2,69	6,11	1,26	0,00
Tanque F	2,73	-	-	3,10	0,00
Wada3	13,69	0,05	0,25	13,97	0,00
Mistura 2	0,00	-	-	0,00	0,00
SetUP 3	0,00	0,00	0,00	0,18	0,00
Mistura 3	0,00	-	-	0,00	0,00
Wtransport 3	0,11	2,94	16,61	0,42	0,00
Tanque V	2,95	-	-	3,13	0,00
P04	5,37	-	-	5,69	0,00
SetUP 4	0,00	0,00	0,00	0,21	0,00
Mistura 4	0,00	-	-	0,00	0,00
Sopro 8	16,63	0,23	-	17,54	0,00
Screenner09	11,67	0,00	0,02	11,48	0,00
Wtransport 4	0,23	0,81	3,41	0,60	0,00
SetUP 5	0,00	0,01	0,01	0,14	0,00
Mistura 5	0,00	-	-	0,00	0,00
Serimatic1_2	0,00	0,18	0,26	0,00	0,00
Wtransport 5	0,32	13,18	20,14	1,23	0,00
Tanque O	2,23	-	-	2,87	0,00
Tanque P	1,09	-	-	1,40	0,00
Wada 2	4,81	0,03	0,04	4,38	0,00
SetUP 6	0,00	0,00	0,01	0,11	0,00
Mistura 6	0,00	-	-	0,00	0,00
Sopro 7	53,40	9,24	10,43	54,97	0,00
Wtransport 6	0,41	8,33	21,40	0,88	0,00
SetUP 7	0,00	0,00	0,00	0,14	0,00
Mistura 7	0,00	-	-	0,00	0,00
Wtransport 7	0,35	3,19	5,04	0,79	0,00
SetUP 8	0,00	0,00	0,00	0,18	0,00
Mistura 8	0,00	-	-	0,00	0,00
Sopro 1	89,36	2,76	10,24	92,09	18,59
Dubuit5_6 e Serimatic1_2	0,00	0,05	0,10	0,00	0,00
Wtransport 8	0,06	6,77	26,39	0,60	0,00
Tanque H	0,75	-	-	0,67	0,00
SetUP 9	0,00	0,00	0,00	0,35	0,00
Mistura 9	0,00	-	-	0,00	0,00
Wtransport 9	0,07	2,42	6,93	0,56	0,00

4.3.4 – Análise dos gráficos para determinação dos gargalos primários e secundários durante a simulação

Podem-se observar também nos gráficos das figuras 4.3 a 4.7, um comparativo visual entre as estações de produção para cada método. No entanto, é somente no gráfico 4.7 (método por meio de gargalos flutuantes) que fica evidente a existência de um gargalo dominante durante todo o processo. Nos demais métodos apesar de não haver sobreposição entre as estações de produção os valores ficaram muito próximos e impedem a afirmação com confiabilidade qual seria o gargalo do processo. Faz-se necessário à análise da flutuação dos

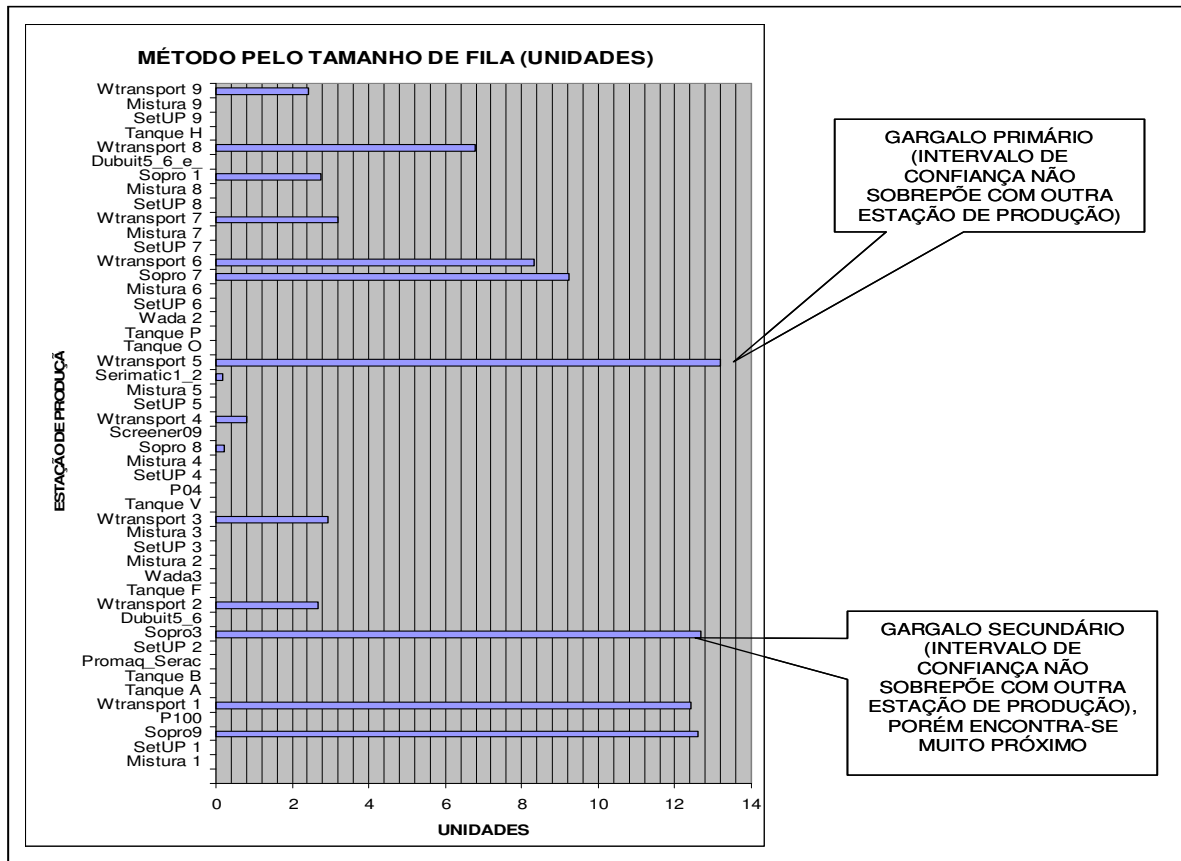


FIGURA 4.4 – GRÁFICO COMPARATIVO ENTRE AS ESTAÇÕES DE PRODUÇÃO ATRAVÉS DO MÉTODO DE TAMANHO DE FILA EM FRENTE À MÁQUINA (MODELO TOTAL)

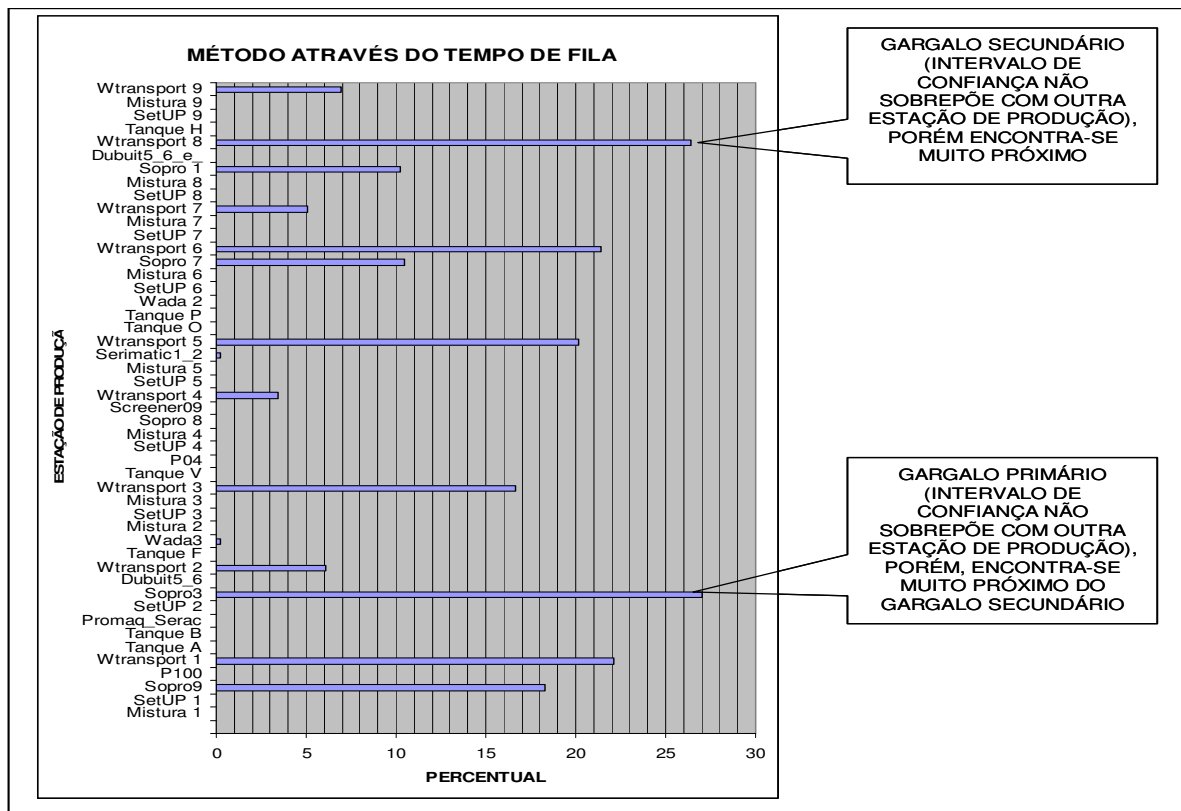


FIGURA 4.5 – GRÁFICO COMPARATIVO ENTRE AS ESTAÇÕES DE PRODUÇÃO ATRAVÉS DO MÉTODO DE TEMPO DE FILA EM FRENTE À MÁQUINA (MODELO TOTAL)

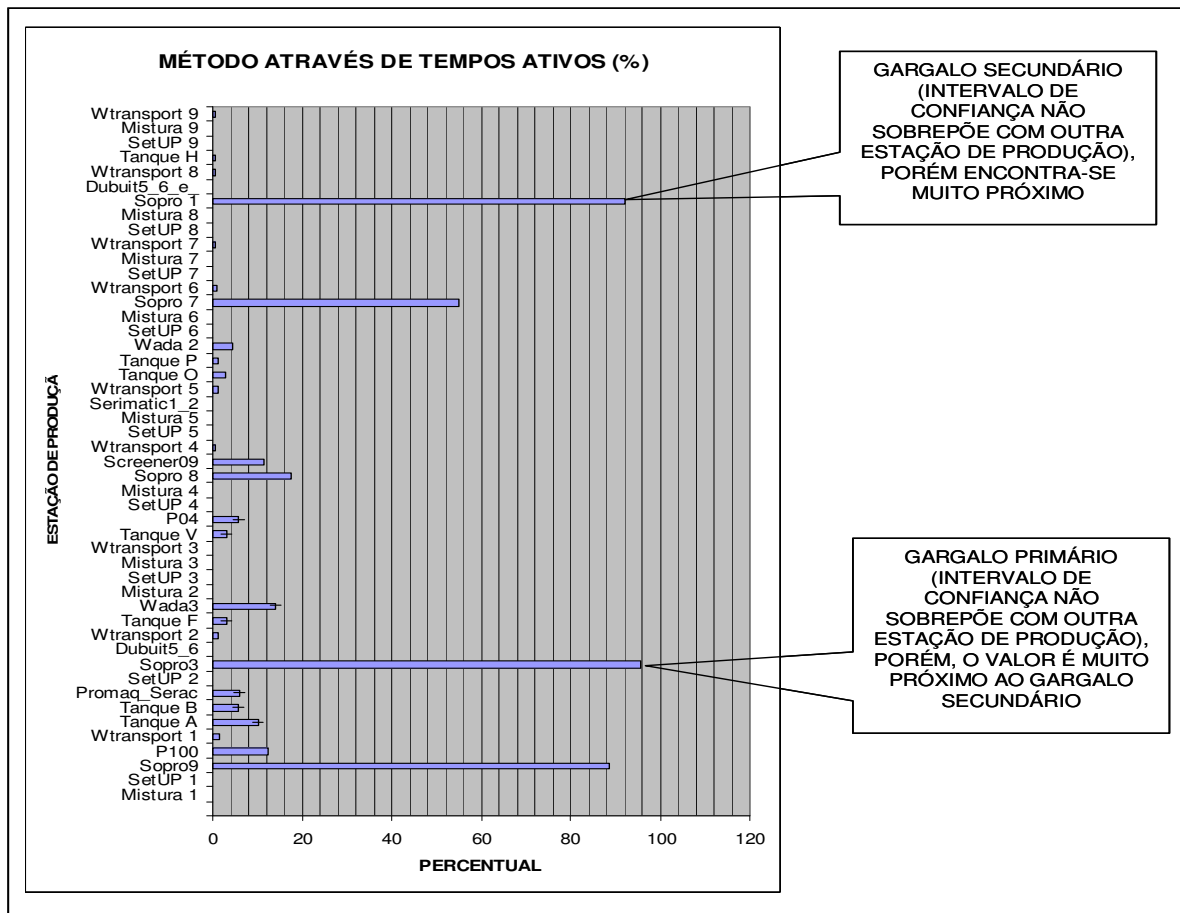


FIGURA 4.6 – GRÁFICO COMPARATIVO ENTRE AS ESTAÇÕES DE PRODUÇÃO ATRAVÉS DO MÉTODO DE TEMPOS ATIVOS (MODELO TOTAL)

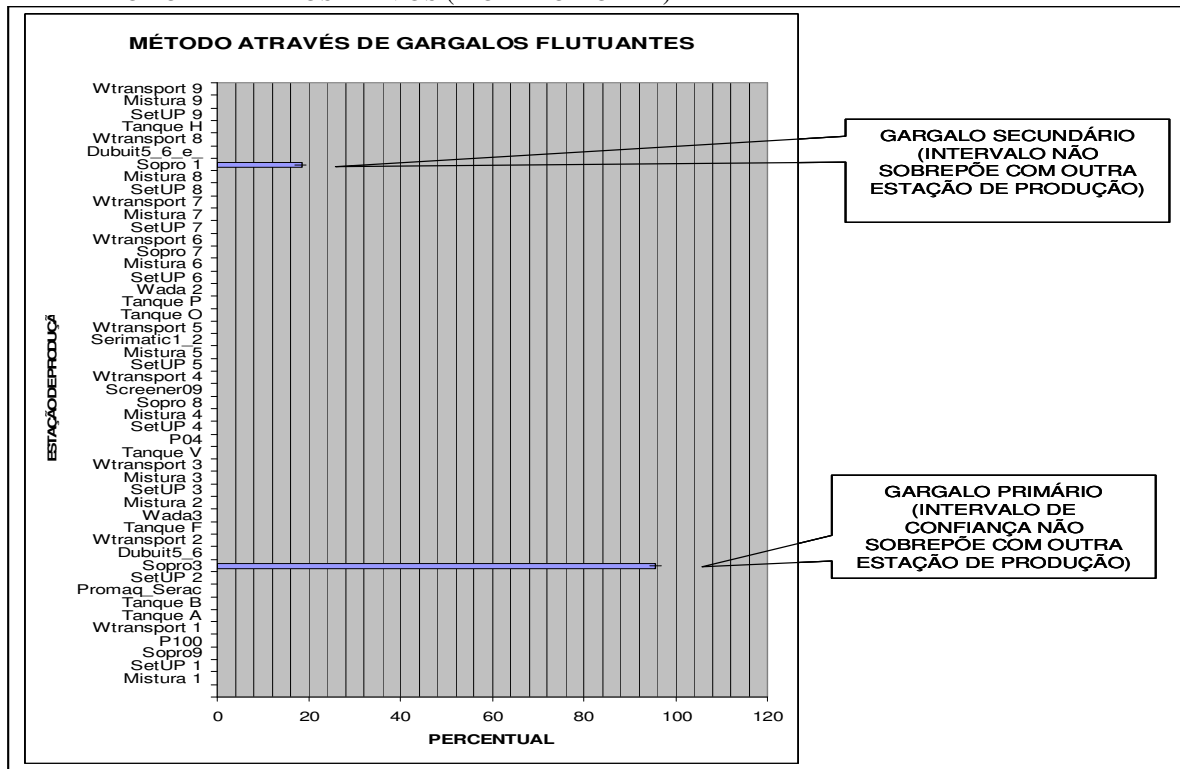


FIGURA 4.7 – GRÁFICO COMPARATIVO ENTRE AS ESTAÇÕES DE PRODUÇÃO ATRAVÉS DO MÉTODO DE TEMPOS ATIVOS EM GARGALOS FLUTUANTES (MODELO TOTAL)

Ao analisar-se apenas os gráficos gerados após as cinco replicações de simulação, somente o método de tempos ativos para gargalos flutuantes é capaz de afirmar com maior segurança os resultados de gargalos primários e secundários. Os demais métodos (Método através do percentual de utilização, Método através do tamanho ou o tempo de fila em frente à máquina e Método através de tempos ativos) não possuem sobreposição entre as estações de produção dentro dos intervalos de confiança, porém, as colunas ficam muito próximas entre o gargalo primário e os gargalos secundários. Isso pode ser observado por intermédio da análise dos gráficos gerados no modelo total, conforme as figuras 4.3 a 4.7.

Porém, para o propósito desse trabalho, ao observar-se o modelo total não foi possível detectar muitas flutuações pela dominância dos gargalos Sopro 1 e Sopro 3. Para tal, faz-se necessário abordar parte do modelo para que verifiquem melhor possíveis flutuações no sistema. Como já descrito na revisão bibliográfica deste trabalho, pode-se abordar um sistema somente em parte do processo para que estude melhor a sua particularidade (ver item 2.5). Para isso um novo estudo que aborde só uma parte do processo será descrito nos próximos tópicos, identificando-o como “análise do modelo reduzido”.

4.4 – MODELO DE SIMULAÇÃO COM O PROCESSO REDUZIDO

Nesse novo estudo considerou-se parte do modelo anterior, conforme a figura 4.8. O processo reduzido consiste basicamente em 20 estações de produção que podem ser equipamentos ou processos compostos de um ou mais equipamentos organizados para o processo de transporte, mistura e envase dos líquidos. A figura 4.9 representa o novo escopo de estudo demarcado no modelo de simulação. O modelo de simulação será executado na íntegra, mas os dados captados para análise serão apenas os das estações de produção referenciada no escopo reduzido.

4.4.1 – Levantamento e Consolidação dos Dados para o Modelo Reduzido

Os resultados gerados na execução do modelo de simulação servirão de base para análise e composição de uma tabela comparativa entre os métodos de detecção de gargalos apresentados neste trabalho. Esses dados foram obtidos a partir dos relatórios gerados pelo SIMUL8® - RESULTS SUMMARY (consolidação dos dados nas tabelas B.1, B.2, B.3 no (ANEXO-II)) e a partir do utilitário e de MACROS no EXCEL® (consolidação dos dados nas tabelas B.4 e B.5 no (ANEXO-II)), com o mesmo critério de extração já descrito no item 4.3.2.

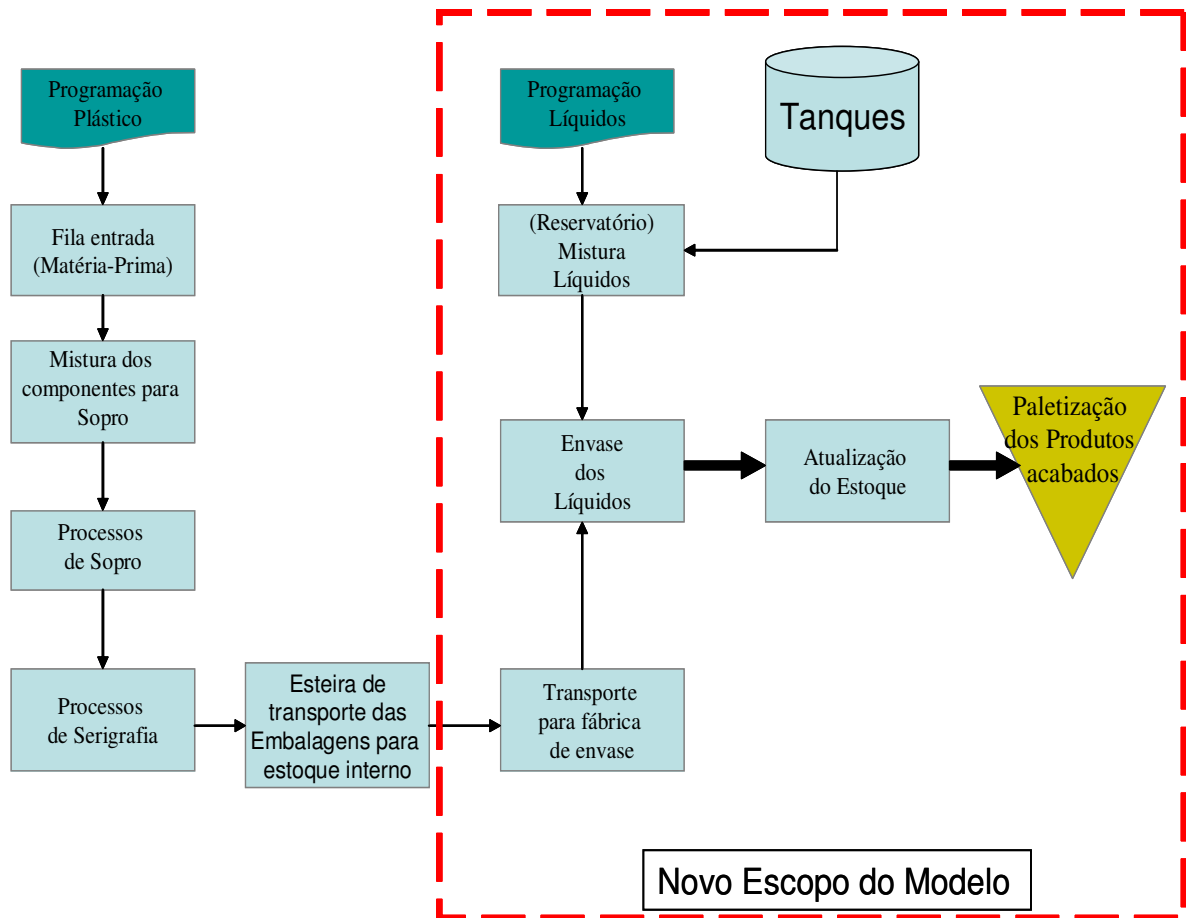


FIGURA 4.8 – NOVO ESCOPO DE ANÁLISE PARA O MODELO

4.4.2 – Análise dos Resultados Gerados pelo Modelo de Simulação (Reduzido)

É demonstrada na tabela 4.3 um comparativo dos resultados gerados pelos diferentes métodos de detecção de gargalos. Ao se compararem as demais estações de produção dentro do mesmo método estão destacadas com um fundo diferenciado na célula da tabela o gargalo do processo com maior valor gerado. Convém destacar que neste novo estudo foi necessário refazer as replicações de simulação a fim de captar apenas os dados gerados pelas estações de produção analisadas neste novo escopo, pois, os utilitários utilizados para consolidação dos dados e geração dos relatórios não poderiam reaproveitar os dados gerados no primeiro estudo.

Ao analisar-se o modelo com o escopo reduzido demonstrado na figura 4.9 com os resultados gerados pela tabela 4.3 conclui-se que a redução do escopo do processo gerou muitas flutuações. Nesse novo modelo (reduzido) o método através do tempo de fila em frente à máquina não se manteve em alinhamento com os métodos através do percentual de utilização, tempos ativos e tempos ativos para gargalos flutuantes como ocorreu no estudo de caso com o modelo total, o que permite verificar que em grandes flutuações de processo o

método através do tempo de fila em frente a máquina não garante confiabilidade nos seus resultados. Novamente o método pelo tamanho de fila em frente à máquina revelou-se incapaz de identificar o gargalo do processo e em algumas estações de produção nem sequer foi possível dimensioná-las. Ambas estão destacadas com um “círculo” na tabela 4.3.

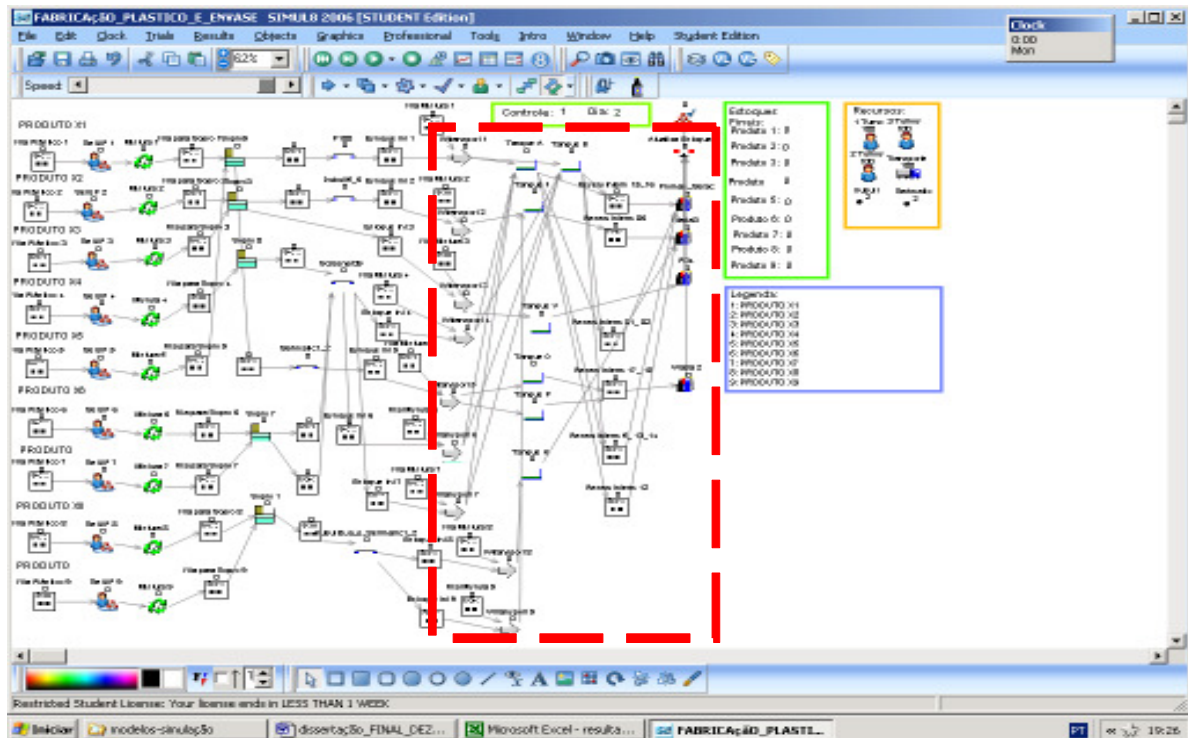


FIGURA 4.9 – NOVO ESCOPO DE ESTUDO PARA O MODELO DE SIMULAÇÃO DE UM PROCESSO REAL

TABELA 4.3 – TABELA COMPARATIVA ENTRE OS MÉTODOS DE DETECÇÃO (MODELO REDUZIDO COM A MÉDIA DE VALORES PARA 7 REPLICAÇÕES)

TABELA COMPARATIVA ENTRE OS MÉTODOS DE DETECÇÃO					
ESTAÇÃO DE PRODUÇÃO	UTILIZAÇÃO (%)	TAMANHO DE FILA (UNIDADES)	TEMPO DE FILA (%)	TEMPOS ATIVOS (%)	GARGALOS FLUTUANTES SOLE+SHIFT (%)
Wtransport 1	0,63	2,69	22,09	0,80	0,71
Tanque A	9,43	-	-	10,85	11,03
Tanque B	4,92	-	-	5,72	4,90
Promaq Serac	5,63	0,00	0,02	5,67	2,07
Wtransport 2	0,13	0,00	6,11	0,32	0,09
Tanque F	2,73	-	-	3,71	2,36
Wada3	13,69	0,05	0,24	13,75	16,13
Wtransport 3	0,11	2,94	16,61	0,11	0,06
Tanque V	2,83	-	-	3,13	3,30
P04	5,37	-	-	5,43	6,21
Wtransport 4	0,23	0,81	3,41	0,29	0,34
Wtransport 5	0,32	0,00	20,14	0,48	0,33
Tanque O	2,23	-	-	2,87	3,34
Tanque P	1,09	-	-	1,40	0,83
Wada 2	4,81	0,00	0,04	4,82	4,03
Wtransport 6	0,41	8,33	21,40	0,50	0,58
Wtransport 7	0,35	5,19	5,04	0,39	0,32
Wtransport 8	0,06	6,77	26,39	0,15	0,04
Tanque H	0,74	-	-	1,04	0,79
Wtransport 9	0,07	2,42	6,93	0,15	0,04

Nesse caso, pela observação dos gráficos gerados após as sete replicações de simulação evidencia-se a existência tanto de gargalos primários como de gargalos secundários. Lembrando que o método através do tamanho de fila no primeiro estudo não foi capaz de detectar corretamente o gargalo, nesse modelo reduzido o método através do tempo de fila em frente a máquina também foi insuficiente para determinar corretamente o gargalo, pois, a estação de produção que gerou o maior valor foi “Wtransport8” a qual diverge dos demais métodos de detecção (método através do percentual de utilização, método através de tempos ativos e método através de tempos ativos para gargalos flutuantes) que convergem para a mesma estação de produção gargalo – Wada3. Nota-se isso pela análise dos gráficos gerados no modelo total, conforme as figuras 4.10 à 4.14).

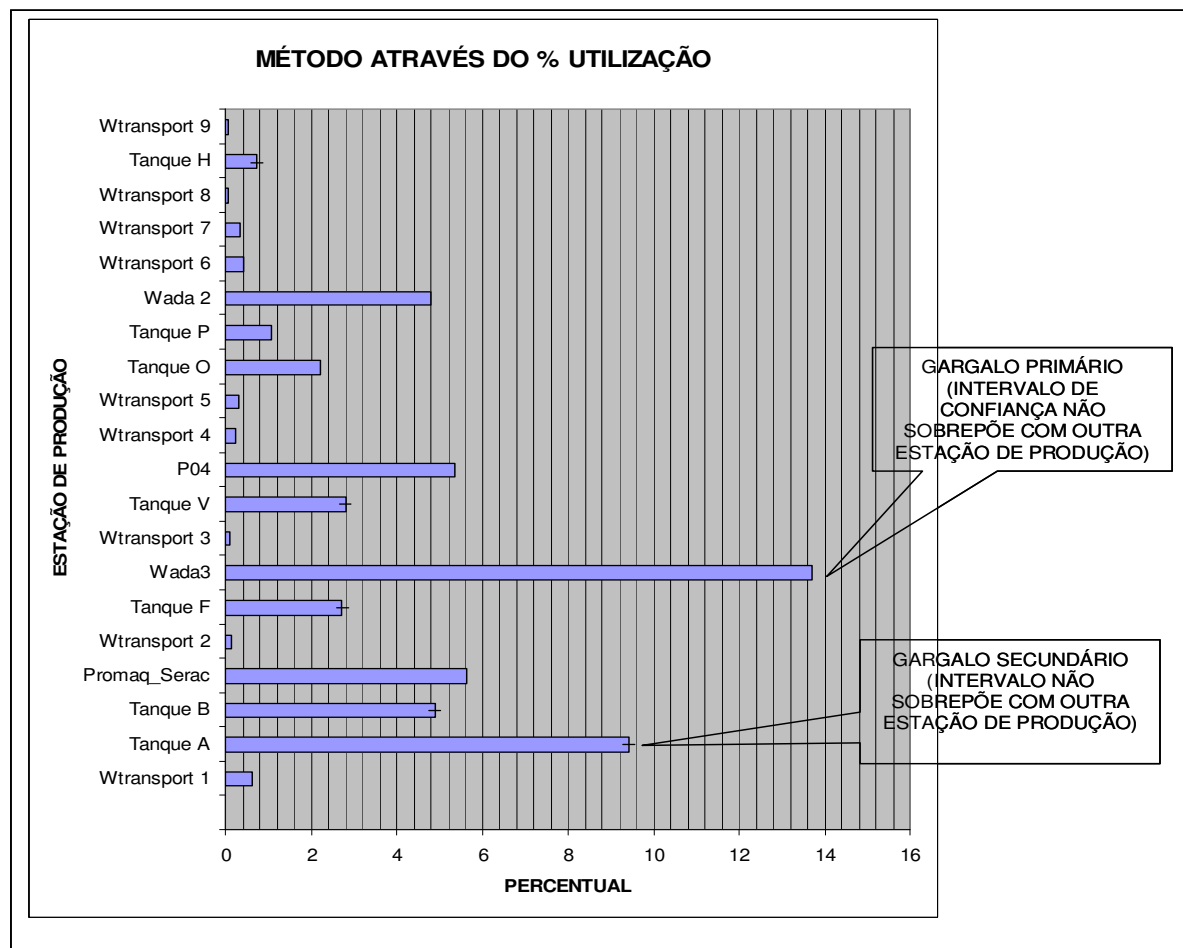


FIGURA 4.10 – GRÁFICO COMPARATIVO ENTRE AS ESTAÇÕES DE PRODUÇÃO ATRAVÉS DO MÉTODO DO PERCENTUAL DE UTILIZAÇÃO (MODELO REDUZIDO)

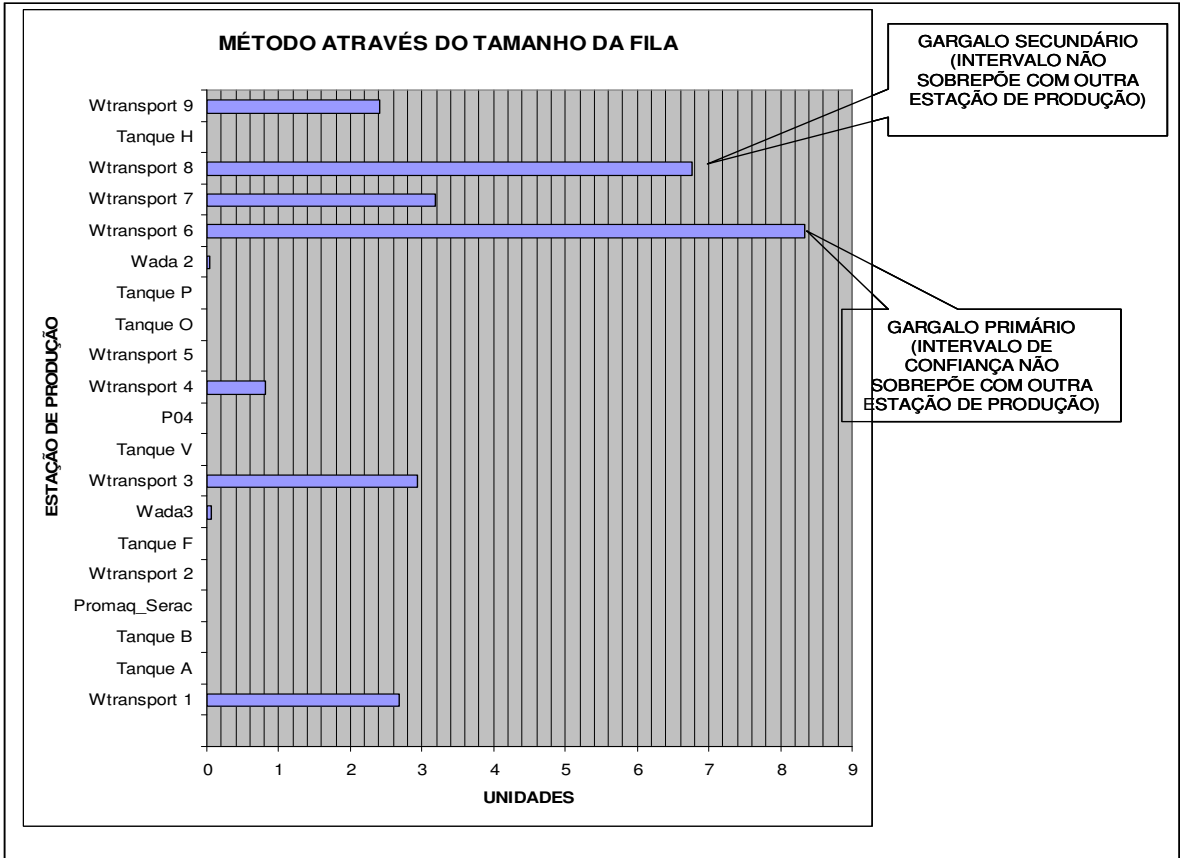


FIGURA 4.11 – GRÁFICO COMPARATIVO ENTRE AS ESTAÇÕES DE PRODUÇÃO ATRAVÉS DO MÉTODO DO TAMANHO DA FILA EM FRENTE À MÁQUINA (MODELO REDUZIDO)

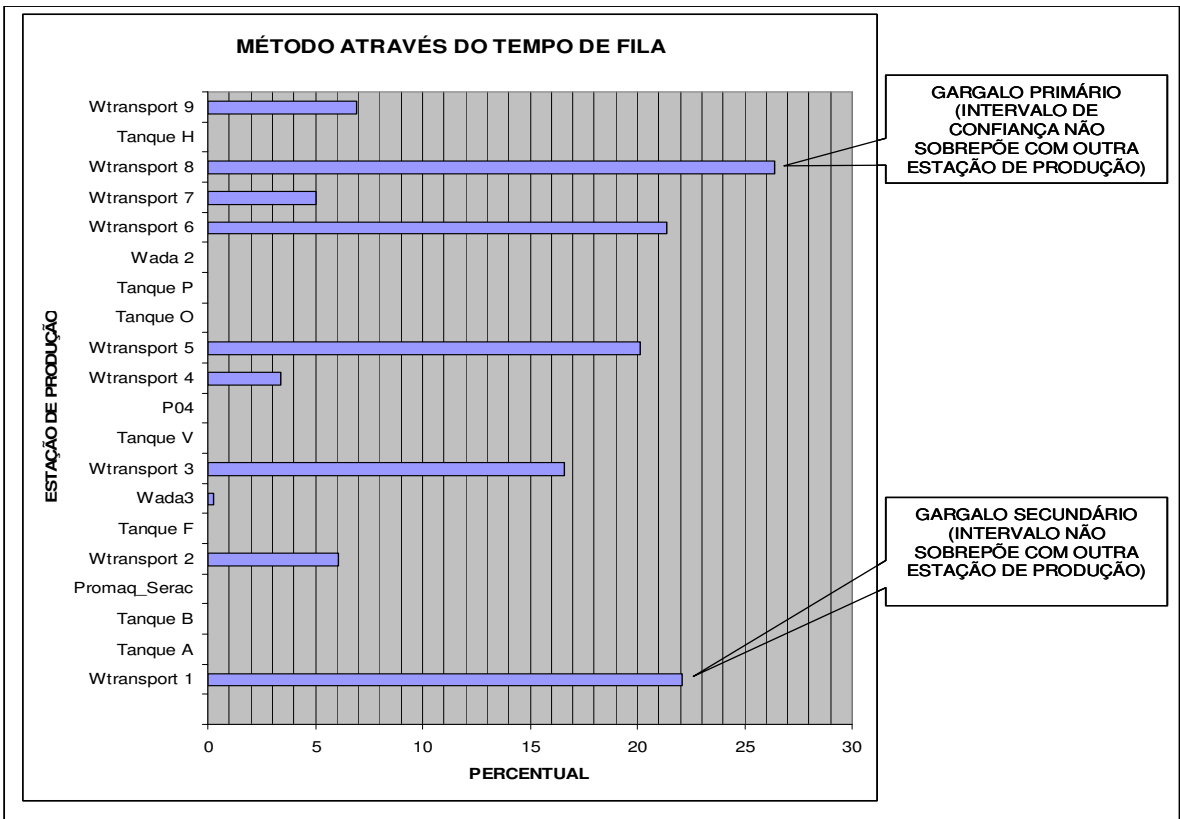


FIGURA 4.12 – GRÁFICO COMPARATIVO ENTRE AS ESTAÇÕES DE PRODUÇÃO ATRAVÉS DO MÉTODO DO TEMPO DE FILA EM FRENTE À MÁQUINA (MODELO REDUZIDO)

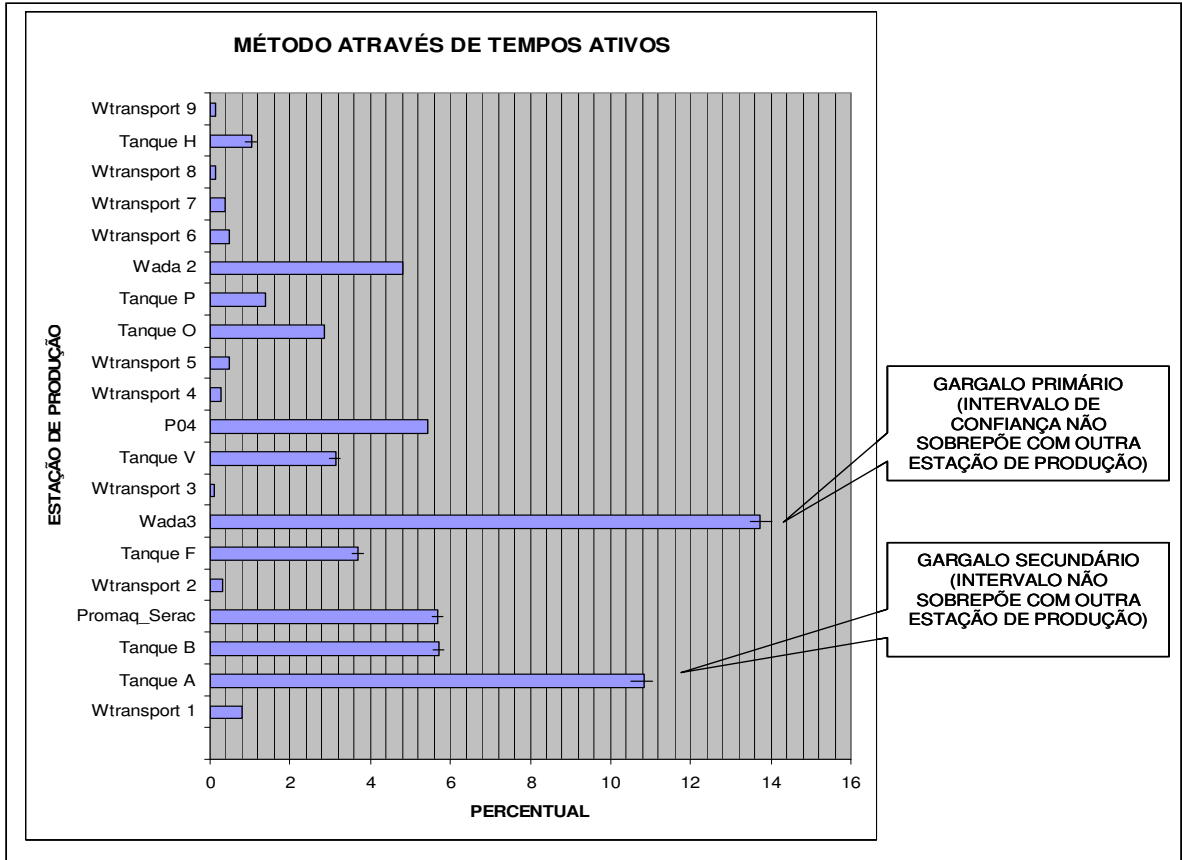


FIGURA 4.13 – GRÁFICO COMPARATIVO ENTRE AS ESTAÇÕES DE PRODUÇÃO ATRAVÉS DO MÉTODO DE TEMPOS ATIVOS (MODELO REDUZIDO)

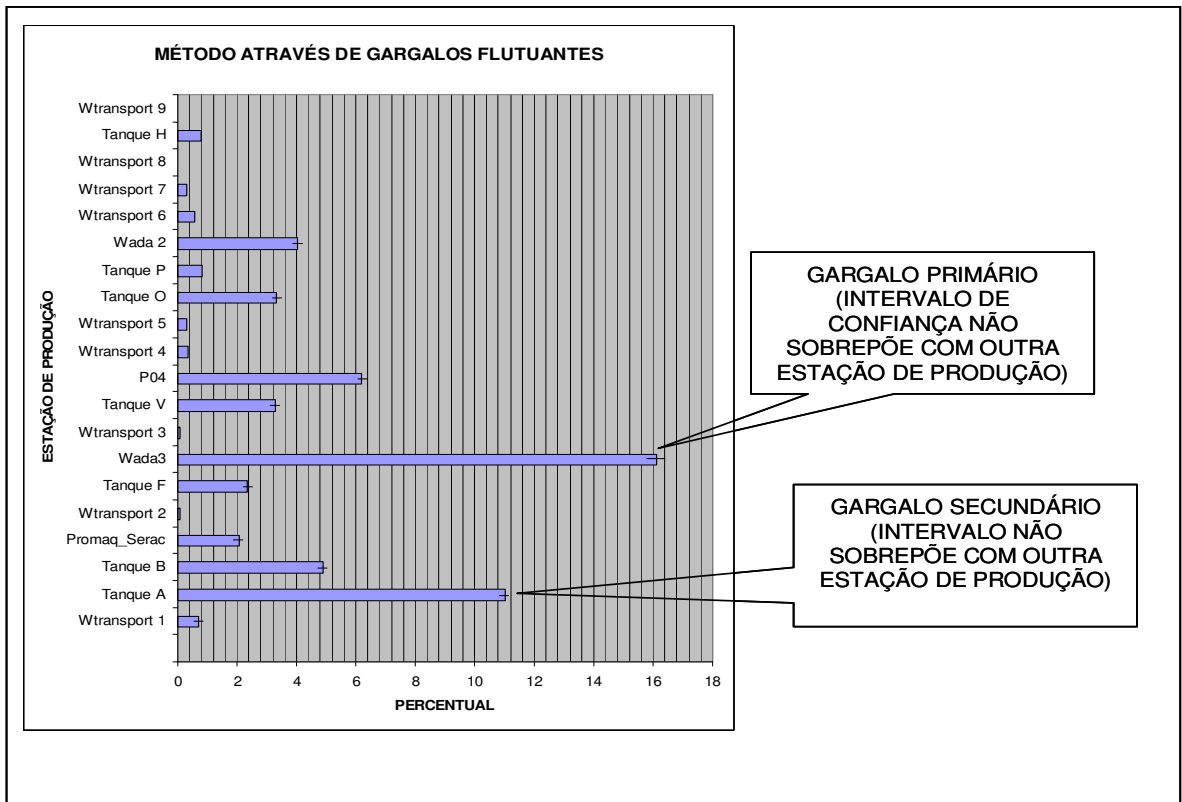


FIGURA 4.14 – GRÁFICO COMPARATIVO ENTRE AS ESTAÇÕES DE PRODUÇÃO ATRAVÉS DO MÉTODO DE GARGALOS FLUTUANTES (MODELO REDUZIDO)

4.4.3 – Análise da Flutuação de gargalos durante a simulação

Apenas no método de tempos ativos para gargalos flutuantes tornou-se possível ver os resultados da flutuação dos gargalos gerados durante a simulação do processo. No primeiro estudo houve apenas uma flutuação de gargalo que ocorreu na estação de produção “Sopro 1” flutuando para a estação de produção “Sopro 3” onde permaneceu como gargalo único até o final da simulação (esse comportamento manteve-se constante durante as cinco replicações de simulação utilizadas no primeiro estudo, ver figura A.1 no (ANEXO-I)).

No segundo estudo, o sistema apresentou mais flutuações durante a execução das simulações do que no primeiro. Como se pode observar em parte do processo demonstrado pela figura B.1 no (ANEXO-II) praticamente todas estações flutuaram durante a simulação e mesmo assim o método de tempos ativos para gargalos flutuantes foi capaz de identificar o gargalo do processo, pois, não houveram sobreposições nos valores gerados pela estação de produção gargalo “Wada3” em relação as demais estações de produção, conforme a figura 4.14. Esse resultado observado na figura 4.14 converge com os resultados gerados pelos métodos de detecção pelo percentual de utilização e pelo método de tempos ativos.

5 – DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

5.1 – TABELA COMPARATIVA ENTRE OS PRINCIPAIS MÉTODOS

Esta seção pretende refazer a tabela comparativa dos principais métodos para detecção de gargalos (vide tabela 3.7 desenvolvida por TANAKA, NAKANO e ROSER (2003)) (método através do percentual de utilização, método através do tempo ou tamanho da fila em frente à máquina, método através de tempos ativos e não-ativos e o método através de tempos ativos em gargalos flutuantes). A partir da tabela 3.7, conclui-se que fazer uso de medidas subjetivas tais como: “Médio”, “Ruim”, “Boa”, “Muito”, “Pouco” está longe de definir se o método proposto pelos autores TANAKA, NAKANO e ROSER realmente é o melhor. Critérios como: “acuracidade” sem medidas objetivas ficam prejudicadas na sua análise, “entendimento do método” também é um critério relativo sem uma definição do seu escopo ou público alvo, “grau de dificuldade na implementação” é um critério relativo e particular a cada empresa; “limitações do sistema” não esclarecem quais limitações seriam essas. Em resumo, será necessário rever os critérios adotados para a comparação dos métodos a serem utilizados no estudo de caso do modelo de simulação real, para assim, determinar qual o melhor método para detecção de gargalos em processos de produção.

Inicialmente se utilizará a mesma estrutura da tabela desenvolvida pelos autores TANAKA, NAKANO e ROSER (2003), onde os critérios com medidas subjetivas serão omitidos na composição da nova tabela, pelas razões explicitadas. Outra mudança na tabela será a comparação do método através do tempo de fila em frente à máquina, pois, a tabela original apresenta apenas o método através do tamanho da fila em frente à máquina e a comparação com o método de detecção de gargalos pelos Tempos Ativos apresentados no primeiro trabalho dos autores TANAKA, NAKANO e ROSER (2001).

Foi levada em consideração a execução do modelo Total para a composição da tabela comparativa. Os critérios possuem medidas objetivas e nenhum critério subjetivo foi incluso como critério de comparação. Também a inclusão de mais dois métodos deixou a tabela comparativa mais completa. Na composição da tabela o método de detecção pelo tamanho da fila em frente à máquina possui sua unidade de medida diferenciada em relação aos demais por se tratar de uma grandeza em unidade de produtos em frente à estação de produção. (vide tabela 5.1)

TABELA 5.1 – TABELA COMPARATIVA ENTRE OS PRINCIPAIS MÉTODOS (REFORMULADA)

CRITÉRIOS	% DE UTILIZAÇÃO	TEMPO DE ESPERA (TAMANHO DA FILA)	TEMPO DE ESPERA (TEMPO DE FILA)	TEMPOS ATIVOS	TEMPOS ATIVOS EM (GARGALOS FLUTUANTES)
ACURACIDADE NA DETECÇÃO DO GARGALO (%)	Diferença de apenas 4,44 % (na média) entre o gargalo primário e o gargalo secundário	Diferença de apenas 3,86 % (na média) entre o gargalo primário e o gargalo secundário	Diferença de apenas 0,68 % (na média) entre o gargalo primário e o gargalo secundário	Diferença de apenas 3,71 % (na média) entre o gargalo primário e o gargalo secundário	Diferença de 77,07 % entre o gargalo primário e o gargalo secundário com um intervalo de confiança de 0,31 (Sole + Shift) no gargalo primário, garantindo não haver sobreposições
REQUERIMENTO DE DADOS (NÚMERO DE INFORMAÇÕES NECESSÁRIAS)	Gerado automaticamente pelo software	Gerado automaticamente pelo software	Gerado automaticamente pelo software	Todas as linhas de tempos ativos gerados pelo software	Todas as linhas de tempos ativos e não ativos gerados pelo software
DETECÇÃO DE GARGALOS PRIMÁRIOS	Diferença de apenas 4,44 % (na média) entre o gargalo primário e o gargalo secundário	Diferença de apenas 3,86 % (na média) entre o gargalo primário e o gargalo secundário	Diferença de apenas 0,68 % (na média) entre o gargalo primário e o gargalo secundário	Diferença de apenas 3,71 % (na média) entre o gargalo primário e o gargalo secundário	Diferença de 77,07 % entre o gargalo primário e o gargalo secundário com um intervalo de confiança de 0,31 (Sole + Shift) no gargalo primário, garantindo não haver sobreposições
DETECÇÃO DE GARGALOS SECUNDÁRIOS	Apresentou 1 Único Gargalo Secundário	Gargalo secundário igual ao gargalo primário dos demais métodos	Gerando Incerteza Em Função Da Sobreposição Dos Valores	Apresentou 1 Único Gargalo Secundário	Apresentou 1 Único Gargalo Secundário
DETECÇÃO DE NÃO-GARGALOS	Não é Possível Identificar	Não é Possível Identificar	Não é Possível Identificar	Não é Possível Identificar	46 Estações De Produção
GRAU DE DIFICULDADE EM IMPLEMENTAÇÃO (DURAÇÃO PARA RODADA DE SIMULAÇÃO)	20 min (tempo simulação + geração do relatório RESULTS SUMMARY)	20 min (tempo simulação + geração do relatório RESULTS SUMMARY)	20 min (tempo simulação + geração do relatório RESULTS SUMMARY)	40 min (tempo simulação + execução da MACRO no EXCEL®)	4 horas 30 min (tempo simulação + execução da MACRO no EXCEL®)

5.2 – ANÁLISE DOS RESULTADOS GERADOS NA TABELA COMPARATIVA

Cabe agora um comentário mais detalhado sobre esta tabela comparativa. O primeiro critério utilizado foi o de acuracidade na detecção do gargalo, onde o método através de tempos ativos em gargalos flutuantes apresentou o melhor resultado (maior margem de diferença) com uma margem de 77,07 % de diferença entre o gargalo primário e o gargalo secundário. Os demais métodos obtiveram uma margem de diferença entre o gargalo primário e o gargalo secundário muito pequeno (menores que 5%). O segundo critério utilizado, o de requerimento de dados, onde se mediu a quantidade de informações necessárias para que o método identifique os gargalos do processo. Nesse critério os métodos mais tradicionais

(percentual de utilização, tempo de fila e tamanho de fila) tiveram um melhor desempenho, isso se deve em função dos *softwares* de simulação já possuírem em seus componentes a geração de resultados consolidados para esses métodos. O terceiro critério utilizado, o de detecção de gargalos primários, onde o método que apresentou o melhor resultado foi o de tempos ativos em gargalos flutuantes com uma margem de 77,07 % entre a estação de produção com o maior valor obtido em relação à segunda estação de produção com o maior valor obtido. O quarto critério utilizado foi o de detecção de gargalos secundários, onde os métodos pelo percentual de utilização, tempos ativos e tempos ativos em gargalos flutuantes apontam apenas um gargalo secundário do processo. Para quinto critério foi analisado apenas o método de tempos ativos em gargalos flutuantes, o qual identificou estações de produção não gargalo. O sexto e último critério é o do grau de dificuldade em implementação medido pelo tempo necessário entre o término da execução do modelo de simulação e a geração dos “relatórios/gráficos”, onde os métodos por tempo ativo e/ou o método por tempo ativo em gargalos flutuantes apresentaram o pior desempenho.

5.3 – DESENVOLVIMENTO DE UMA TABELA DE RECOMENDAÇÕES DE USOS

Uma das contribuições propostas desse trabalho é o de auxiliar na escolha do melhor método a ser adotado quando se faz necessário à identificação e análise de gargalos em processos produtivos. Após a avaliação dos principais métodos abordados neste trabalho (método através do percentual de utilização, método através do tempo e do tamanho da fila em frente à máquina, método de tempos ativos e não ativos e o método de tempos ativos em gargalos flutuantes), elaborou-se uma tabela de recomendações para uso destes métodos. Para isso, foram levadas em consideração as necessidades mencionadas durante a simulação do processo para identificação e exame de gargalos. Critérios como *mix* de produtos, quantidade de estações de produção e flutuações de processo foram combinados entre si a fim de determinar cada caso.

A tabela 5.2 resume todo conhecimento obtido a partir da confecção deste trabalho, além de trazer recomendações de uso ou não para os métodos, bem como o uso com algumas restrições. Vale lembrar que esta tabela foi generalizada a partir de um caso específico e que, portanto, pode haver algumas exceções.

TABELA 5.2 – TABELA DE RECOMENDAÇÕES DE USO

NECESSIDADES	% DE UTILIZAÇÃO	TEMPO DE ESPERA (TAMANHO DA FILA)	TEMPO DE ESPERA (TEMPO DE FILA)	TEMPOS ATIVOS	TEMPOS ATIVOS EM (GARGALOS FLUTUANTES)
SISTEMAS COM UM PEQUENO MIX DE PRODUTOS, POUCAS ESTAÇÕES DE PRODUÇÃO E BAIXA FLUTUAÇÃO	RECOMENDADO	RECOMENDADO, MAS COM RESTRIÇÃO PARA SISTEMAS QUE NÃO POSSUEM FILAS, OU FILAS COM TAMANHO FINITO OU UNITÁRIO	RECOMENDADO MAS COM RESTRIÇÃO PARA SISTEMAS QUE NÃO POSSUEM FILAS	RECOMENDADO	RECOMENDADO NOS CASOS ONDE NÃO SEJA POSSIVEL APLICAR OS DEMAIS MÉTODOS
SISTEMAS COM UM GRANDE MIX DE PRODUTOS, POUCAS ESTAÇÕES DE PRODUÇÃO E BAIXA FLUTUAÇÃO	RECOMENDADO	RECOMENDADO, MAS COM RESTRIÇÃO PARA SISTEMAS QUE NÃO POSSUEM FILAS, OU FILAS COM TAMANHO FINITO OU UNITÁRIO	RECOMENDADO MAS COM RESTRIÇÃO PARA SISTEMAS QUE NÃO POSSUEM FILAS	RECOMENDADO	RECOMENDADO NOS CASOS ONDE NÃO SEJA POSSIVEL APLICAR OS DEMAIS MÉTODOS
SISTEMAS COM UM PEQUENO MIX DE PRODUTOS, POUCAS ESTAÇÕES DE PRODUÇÃO E ALTA FLUTUAÇÃO	POUCO RECOMENDADO	POUCO RECOMENDADO E COM RESTRIÇÃO PARA SISTEMAS QUE NÃO POSSUEM FILAS	POUCO RECOMENDADO E COM RESTRIÇÃO PARA SISTEMAS QUE NÃO POSSUEM FILAS	POUCO RECOMENDADO	RECOMENDADO
SISTEMAS COM UM GRANDE MIX DE PRODUTOS, MUITAS ESTAÇÕES DE PRODUÇÃO E ALTA FLUTUAÇÃO	POUCO RECOMENDADO	NÃO RECOMENDADO	NÃO RECOMENDADO	POUCO RECOMENDADO	RECOMENDADO

Ao examinar a tabela 5.2, deduz-se que em sistemas com um pequeno *mix* de produtos e baixa flutuação dos processos são mais recomendáveis os métodos através do percentual de utilização ou de tempos ativos. Para sistemas com um grande *mix* de produtos mas com uma baixa flutuação do processo indica-se a utilização do método de percentual de utilização ou o método de tempos ativos. Em sistemas com alta flutuação aconselha-se a utilização do método de tempos ativos em gargalos flutuantes independente da quantidade de estações de produção ou do tamanho do *mix* de produtos. Os métodos pelo tamanho da fila ou pelo tempo de fila têm sua aplicação proposta para os casos de baixa flutuação do processo, porém, devem ser utilizados somente em sistemas com filas. Em um caso geral, onde se desconhece previamente as flutuações, o método de detecção de tempos ativos em gargalos flutuantes é sempre sugerido, embora seu desempenho computacional seja pior.

6 – CONCLUSÃO

Este trabalho procurou dissertar sobre os principais métodos de detecção de gargalos em processos de produção (método através do percentual de utilização, método através do tempo ou tamanho da fila em frente à máquina, método através de tempos ativos e não-ativos e o método através de tempos ativos em gargalos flutuantes), bem como, sua interação com a simulação de eventos discretos. Um dos objetivos principais relacionou-se com a utilização desses métodos em um modelo de simulação de um processo real aplicado na indústria química e a análise comparativa dos principais métodos de detecção de gargalos.

Este estudo trouxe uma contribuição complementar ao trabalho de TANAKA, NAKANO e ROSER (2003), visto que se trabalhou com um modelo real e não simplesmente um caso didático, além de que para a geração da tabela comparativa utilizaram-se critérios objetivos. O fato interessante é que a maioria das conclusões do trabalho de TANAKA, NAKANO e ROSER (2003) foram confirmadas, ou seja, evidenciou-se que o método que apresentou maior confiabilidade nos seus resultados e melhor visibilidade no comportamento do gargalo foi o método através de tempos ativos em gargalos flutuantes

Quando o processo reduziu em seu escopo para o estudo de suas possíveis flutuações, o método de detecção por tempo ativo em gargalos flutuantes mostrou-se mais uma vez eficaz. O método que obteve o pior desempenho neste estudo foi o método através do tamanho da fila em frente à máquina, pois, em nenhum dos dois casos estudados conseguiu-se identificar o gargalo do processo com confiabilidade. Estas conclusões também foram obtidas por TANAKA, NAKANO e ROSER (2003).

Gerou-se ainda uma tabela de recomendações de uso. Assim, para sistemas com grandes flutuações em seus processos, o melhor método para detecção de gargalos mostrou-se como o método de tempos ativos em gargalos flutuantes, pois permite identificar o gargalo principal do processo, demonstra as flutuações entre os gargalos em qualquer momento do processo. Para sistemas simples onde inexistam grandes flutuações no processo, o uso do método através de tempos ativos ou o uso do método através do percentual de utilização pode ser aplicado perfeitamente. Para processos onde hajam filas bem definidas e cujo processo seja sem grandes flutuações o método através do tempo de fila em frente à máquina pode ser executado. Porém, o método através do tamanho da fila em frente à máquina não desfrutou de

bons resultados neste trabalho e recomenda-se utilizá-lo apenas nos casos em que não seja possível o uso dos demais métodos.

Pode-se depreender que, a partir do uso da simulação em conjunto com métodos de detecção de gargalos, existe ganho de produtividade pois se reduzem os custos de implantação em novos processos, bem como, diminui-se o tempo para a detecção de gargalos pois permite analisar vários métodos com os mesmos resultados gerados durante o processo de simulação.

Como sugestão para futuros trabalhos há a continuidade da aplicação dos métodos para outros modelos de simulação em processos reais dentro da indústria química ou em outros processos, para aperfeiçoar assim a tabela comparativa. Também seria produtivo efetuar a comparação dos métodos estudados acima a partir de informações extraídas de *softwares* de supervisão da produção (sistemas supervisórios). Além disso, testes de sensibilidade podem ser aplicados aos modelos estudados para evidenciar a detecção do gargalo pelos métodos de identificação de gargalos de processo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADAMS, J.; BALAS E.; ZAWACK D. The shifting Bottleneck Procedure for Job Shop Scheduling. **Management Science**, v. 34, n. 3 , p. 391-401, 1988.
- ANEJA Y. P.; PUNNEN A. P. Multiple Bottleneck assignment problem. **European Journal of Operational Research**, v. 112, p. 167-173, 1999.
- BANKS, J. **Discrete-Event Systems Simulation**. Prentice-Hall, 1996. p. 1-89.
- BANKS, J. Introduction to Simulation. In: **Proceedings of the 2000 Winter Simulation Conference, 2000**. Brooks Automation, AutoSimulations Division Atlanta, GA 30067, U.S.A.
- BELLANDER, M. **Workflow bottleneck and problems areas influencing production management needs in commercial printing**. KTH, 1998.
- BERGER, A.; BREGMAN, L.; KOGAN, Y. **Bottleneck Analysis in Multiclass Closed Queueing**. Networks and Its Application Queueing Systems, p. 3-4, 217-237, 1999.
- BLACKSTONE, J. Theory of Constraints – a status report. **International Journal of Production Research**, v. 39, n. 6, p. 1053-1080, 2001.
- BLAKE, R. P.; BREESE, J. S. **Automatic Bottleneck Detection**. Technical Report MSR-TR-95-10, Microsoft Corporation (Redmond, WA), USA, 1995.
- BRONSON; R. **Pesquisa Operacional**, McGraw-Hill do Brasil, 1985, cap. 22 e 23.
- BYRNE, M.D. A simulation-based method to aid the improvement of manufacturing flexibility. **International Journal of Production Economics**, v. 26, p. 153-159, 1992.
- BYRNE, M.D.; JACKSON, R.J. A study of bottlenecks in a MRP environment using simulation. **International Journal of Production Economics**, v. 35, p. 115-120, 1994.
- BUFFA, E. S.; SARIN, R. K. **Modern production/operations management**. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1987. 834 p.
- CASSANDRAS, C. G. **Discrete event systems: modeling and performance analysis**. Akren A.I. Publishers, 1993. p. 501-580.
- CHWIF, L. **Redução de modelos de simulação de eventos discretos na sua concepção: uma abordagem causal**. Tese de doutoramento apresentada à Escola Politécnica de São Paulo. 1999. p. 1-61.
- CHWIF, L.; MEDINA, A. C. **Modelagem e simulação de eventos discretos: teoria & prática**. Editora dos Autores, 2006.

- CÔRREA, H. L.; GIANESI, I. G. **Just in time, MRPII, OPT: um enfoque estratégico**. Editora Atlas, 1995. p. 143-177.
- COX, J. F. III; SPENCER, M. S. **The Constraints Management Handbook**. Boca Raton, Florida: CRC Press - St. Lucie Press, 1997.
- DROBOUCHEVITCH, I. G.; STRUSEVICH, V. A. Heuristics for the two-stage job shop scheduling problem with a bottleneck machine. **European Journal of Operational Research**, v. 123, p. 229-240, 2000.
- ELORANTA, E.; RAISANEN J. Evaluation and design of plant layout by simulation. In: **Proceedings of the 3th International Conference on Simulation in Manufacturing**, p. 11-22, 1997.
- GOLDRATT, E. M. **The Goal: A Process of Ongoing Improvement**. North River Press, 1992.
- GORDON, G. **System Simulation**. 2nd ed., Editora Prentice-Hall, 1978. p. 173-181.
- GROSFELD-NIR, A. Single Bottleneck systems with proportional expected yields and rigid demand. **European Journal of Operational Research**, v. 80, p. 297-307, 1995.
- HOLLOCKS, B. Discrete-event: an inquiry into user practice. **Simulation Practice and Theory**, v. 8, p. 451-471, 2001.
- IVENS, P.; LAMBRECHT, M. Extending the shifting Bottleneck Procedure to real-life applications. **European Journal of Operational Research**, v. 90, p. 252-268, 1996.
- JAYARAMAN, A.; GUNAL, A. K. Applications of discrete event simulation in the design of automotive power train manufacturing systems. **Proceedings of the 1997 Winter Simulation Conference**, p. 758-764, 1996.
- KOLTAI, T. Fixed Cost Oriented Bottleneck Analysis with Linear Programming. **International Journal Management Science**, v. 23 , n. 1, p. 89-95, 1995.
- LAPIN, L. **Quantitative Methods for business decisions with cases**. 4th ed., Ed. Harcourt Brace Jovanivich Publishers, 1998.
- LAW, A. M.; KELTON, D. W. **Simulation Modeling & Analysis**. McGraw Hill, 1991. p. 106-135, 696-735.
- LAWRENCE, S. R.; BUSS, H. **How to use tooling analysis to reduce set-up time and improve throughput**. Production and Inventory Management Journal, v. 37, n. 3, p. 75-80, 1997.
- LITT, S. **Troubleshooting: Tools, Tips and Techniques**. 1990. ISBN 0-9724825-1-2.
- LUTHI, J.; HARING, G. Bottleneck Analysis for Computer and Communication Systems with Workload Variabilities & Uncertainties. In: **Proceedings of 2nd International**

- Symposium on Mathematical Modelling**, I. Troch and F. Breiteneker, Vienna, Austria, p. 525-534, 1997.
- MARTELLO, S.; TOTH, P. The Bottleneck Generalized Assignment Problem, **European Journal of Operational Research**, v. 83, p. 621-638, 1995.
- MOSS, H.; BIN, Y. W. Toward the estimation of bottleneck shiftiness in a manufacturing operation. **Production and Inventory Management Journal**, v. 40, n. 2, p. 53-58. 1999.
- NEELY, A. D.; BYRNE, M. D. A simulation study of bottleneck scheduling. **International Journal of Production Economics**, v. 26, p. 187-192, 1992.
- NIGEL, S. **Vantagem competitiva em manufatura: atingindo competitividade nas operações industriais**. Editora Atlas, 1993. p. 50-64.
- NEWELL, G. F. A Moving Bottleneck. **Transportation Research**, v. 32, p. 531-537, 1996.
- NYMON, J. G. Using analytical and simulation modelling for early factory prototyping. In: **Proceedings of the 1987 Winter Simulation Conference**, 721-723, 1987.
- JONES, G.; ROBERTS, M. **Optimized Production Technology**. Londres: IFS Publications, 1990.
- O'KANE, J. F.; SPENCELEY, J. R.; TAYLOR, R. Simulation as an essential tool for advanced manufacturing technology problems. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 107, p. 412-424, 2000.
- PUNNEN, A. P. On combined minimax-minsum optimization. **Computers and Operational Research**, v. 21, p. 707-716, 1994.
- RAMUDHIN, A.; MARIER, P. The Generalized Shifting Bottleneck Procedure. Theory and Methodology. **European Journal of Operational Research**, v. 93, p. 34-48, 1996.
- ROSER, C.; NAKANO, M.; TANAKA, M. A. Practical Bottleneck Detection Method. In: **Proceedings of the 2001 Winter Simulation Conference**, p. 949-953, 2001.
- ROSER, C.; NAKANO, M.; TANAKA, M. A. Shifting B Bottleneck Detection. In: **Proceedings of the 2002 Winter Simulation Conference**, p. 1079-1086, 2002.
- ROSER, C.; NAKANO, M.; TANAKA, M. A. Comparison of Bottleneck Detection Methods for AGV Systems. In: **Proceedings of the 2003 Winter Simulation Conference**, p. 1192-1198, 2003.
- SALIBY, E. **Repensando a Simulação - Amostragem Descritiva**. Ed. Atlas S.A, 1989. 17-20.
- TECNOMATIX TECHNOLOGIES, LTDA. (NASDAQ: TCNO). Disponível em: <<http://www.tecnomatix.com>>. Acesso em 20/06/2002.

ANEXO I – RELATÓRIOS DO PRIMEIRO ESTUDO

TABELA A.1 – CONSOLIDADO PERCENTUAL DE UTILIZAÇÃO (MODELO TOTAL)

CONSOLIDADO PERCENTUAL DE UTILIZAÇÃO							
ESTAÇÃO DE PRODUÇÃO	1. replicação	2. replicação	3. replicação	4. replicação	5. replicação	MEDIA	INTERVALO CONFIANÇA
	%	%	%	%	%	%	
Mistura 1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-
SetUP 1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-
Sopro9	84,85	84,85	84,85	84,85	84,85	84,85	-
P100	11,90	11,90	11,67	11,90	11,90	11,85	0,09
Wtransport 1	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63	0,00
Tanque A	9,31	9,43	9,38	9,55	9,46	9,43	0,08
Tanque B	5,01	4,91	4,96	4,79	4,90	4,91	0,07
Promaq_Sera	5,63	5,63	5,63	5,63	5,63	5,63	0,00
SetUP 2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-
Sopro3	93,08	93,08	93,08	93,08	93,08	93,08	0,00
Dubuit5_6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-
Wtransport 2	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	-
Tanque F	2,72	2,73	2,73	2,75	2,72	2,73	0,01
Wada3	13,69	13,69	13,69	13,69	13,69	13,69	-
Mistura 2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-
SetUP 3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-
Mistura 3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-
Wtransport 3	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	-
Tanque V	2,84	3,10	2,96	3,08	2,77	2,95	0,13
P04	5,37	5,37	5,37	5,37	5,37	5,37	-
SetUP 4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-
Mistura 4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-
Sopro 8	16,63	16,63	16,63	16,63	16,63	16,63	0,00
Screenner09	11,67	11,67	11,67	11,67	11,67	11,67	-
Wtransport 4	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	-
SetUP 5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-
Mistura 5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-
Serimatic1_2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-
Wtransport 5	0,32	0,32	0,32	0,32	0,32	0,32	-
Tanque O	2,23	2,23	2,23	2,23	2,23	2,23	-
Tanque P	1,09	1,09	1,09	1,09	1,09	1,09	0,00
Wada 2	4,81	4,81	4,81	4,81	4,81	4,81	-
SetUP 6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-
Mistura 6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-
Sopro 7	53,40	53,40	53,40	53,40	53,40	53,40	-
Wtransport 6	0,41	0,41	0,41	0,41	0,41	0,41	-
SetUP 7	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-
Mistura 7	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-
Wtransport 7	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	-
SetUP 8	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-
Mistura 8	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-
Sopro 1	89,36	89,36	89,36	89,36	89,36	89,36	-
Dubuit5_6_e	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-
Wtransport 8	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	-
Tanque H	0,74	0,76	0,74	0,75	0,76	0,75	0,01
SetUP 9	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-
Mistura 9	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-
Wtransport 9	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	-

TABELA A.2 – CONSOLIDADO TAMANHO DE FILA EM FRENTE A MÁQUINA (MODELO TOTAL)

CONSOLIDADO TAMANHO DE FILA EM FRENTE A MÁQUINA							
ESTAÇÃO DE PRODUÇÃO	1. replicação	2. replicação	3. replicação	4. replicação	5. replicação	MEDIA	INTERVALO CONFIANÇA
	unidades	unidades	unidades	unidades	unidades	unidades	
Mistura 1	-	-	-	-	-	-	-
SetUP 1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-
Sopro9	12,61	12,61	12,61	12,61	12,61	12,61	-
P100	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	-
Wtransport 1	12,43	12,43	12,43	12,43	12,43	12,43	-
Tanque A	-	-	-	-	-	-	-
Tanque B	-	-	-	-	-	-	-
Promaq_Serac	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-
SetUP 2	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	-
Sopro3	12,67	12,67	12,67	12,67	12,67	12,67	-
Dubuit5_6	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	-
Wtransport 2	2,69	2,69	2,69	2,69	2,69	2,69	-
Tanque F	-	-	-	-	-	-	-
Wada3	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	-
Mistura 2	-	-	-	-	-	-	-
SetUP 3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-
Mistura 3	-	-	-	-	-	-	-
Wtransport 3	2,94	2,94	2,94	2,94	2,94	2,94	-
Tanque V	-	-	-	-	-	-	-
P04	-	-	-	-	-	-	-
SetUP 4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-
Mistura 4	-	-	-	-	-	-	-
Sopro 8	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	-
Screeners09	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-
Wtransport 4	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	-
SetUP 5	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	-
Mistura 5	-	-	-	-	-	-	-
Serimatic1_2	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	-
Wtransport 5	13,18	13,18	13,18	13,18	13,18	13,18	-
Tanque O	-	-	-	-	-	-	-
Tanque P	-	-	-	-	-	-	-
Wada 2	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	-
SetUP 6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-
Mistura 6	-	-	-	-	-	-	-
Sopro 7	9,24	9,24	9,24	9,24	9,24	9,24	-
Wtransport 6	8,33	8,33	8,33	8,33	8,33	8,33	-
SetUP 7	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-
Mistura 7	-	-	-	-	-	-	-
Wtransport 7	3,19	3,19	3,19	3,19	3,19	3,19	-
SetUP 8	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-
Mistura 8	-	-	-	-	-	-	-
Sopro 1	2,76	2,76	2,76	2,76	2,76	2,76	-
Dubuit5_6_e							
Serimatic1_2	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	-
Wtransport 8	6,77	6,77	6,77	6,77	6,77	6,77	-
Tanque H	-	-	-	-	-	-	-
SetUP 9	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-
Mistura 9	-	-	-	-	-	-	-
Wtransport 9	2,42	2,42	2,42	2,42	2,42	2,42	-

TABELA A.4 – CONSOLIDADO TEMPOS ATIVOS (MODELO TOTAL)

[illegible]

TABELA A.5 – CONSOLIDADO TEMPOS ATIVOS EM GARGALOS FLUTUANTES (MODELO TOTAL)

[illegible]

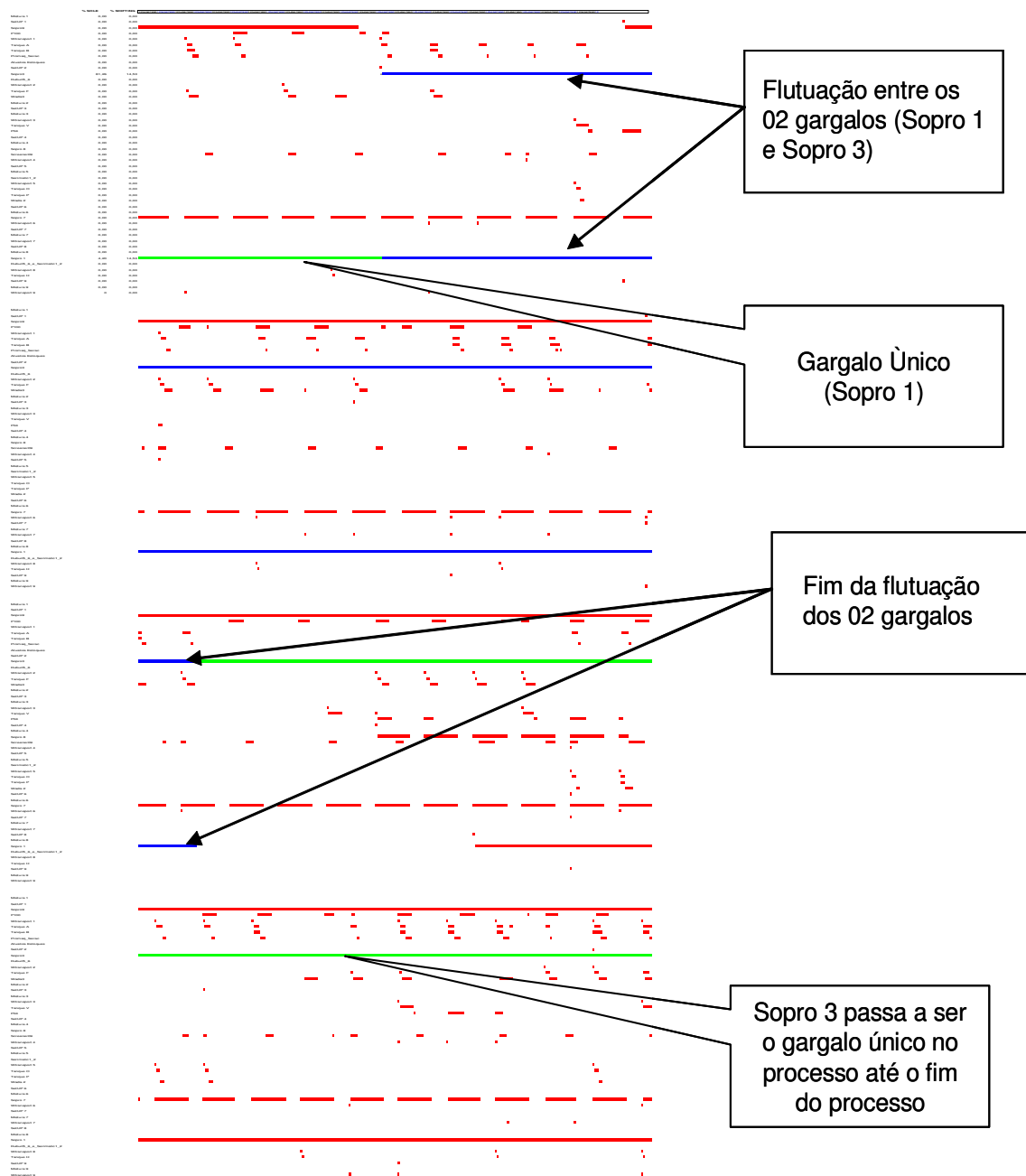


FIGURA A.1 – GRÁFICO DE GARGALOS FLUTUANTES (MODELO TOTAL)

ANEXO II – RELATÓRIOS DO SEGUNDO ESTUDO

TABELA B.1 – CONSOLIDADO PERCENTUAL DE UTILIZAÇÃO (MODELO REDUZIDO)

[illegible]

TABELA B.2 – CONSOLIDADO TAMANHO DA FILA EM FRENTE À MÁQUINA (MODELO REDUZIDO)

[illegible]

TABELA B.3 – CONSOLIDADO TEMPO DE FILA EM FRENTE À MÁQUINA (MODELO REDUZIDO)

[illegible]

TABELA B.4 – CONSOLIDADO TEMPOS ATIVOS (MODELO REDUZIDO)

[illegible]

TABELA B.5 – CONSOLIDADO GARGALOS FLUTUANTES (MODELO REDUZIDO)

CONSOLIDADO GARGALOS FLUTUANTES																				
ESTAÇÃO DE PRODUÇÃO	1. replicação		2. replicação		3. replicação		4. replicação		5. replicação		6. replicação		7. replicação		MÉDIA		SOMA	INT. CONF		
	% SOLE	% SHIFT	% SOLE	% SHIFT	% SOLE	% SHIFT	% SOLE	% SHIFT	% SOLE	% SHIFT	% SOLE	% SHIFT	% SOLE	% SHIFT	% SOLE	% SHIFT	SOLE+SHIFT	% SOLE	% SHIFT	
Wtransport 1	0,12	0,44	0,15	0,58	0,15	0,61	0,15	0,53	0,15	0,61	0,17	0,58	0,15	0,56	0,15	0,56	0,71	0,01	0,04	
Tanque A	1,95	8,93	1,80	8,82	1,78	9,56	1,96	8,75	1,75	9,24	1,75	8,98	2,16	9,75	1,88	9,15	11,03	0,11	0,28	
Tanque B	0,65	4,43	0,68	4,01	0,59	3,66	0,60	4,85	0,63	4,67	0,63	4,38	0,61	3,94	0,63	4,28	4,90	0,02	0,31	
Promag Serac	1,28	0,89	1,26	0,70	1,21	0,95	1,27	0,70	1,30	0,88	1,21	0,91	1,30	0,65	1,26	0,81	2,07	0,03	0,09	
Wtransport 2	0,06	0,02	0,07	0,02	0,07	0,04	0,07	0,02	0,07	0,02	0,07	0,02	0,07	0,02	0,07	0,02	0,09	0,00	0,01	
Tanque F	0,55	1,58	0,56	1,77	0,57	1,68	0,54	1,89	0,60	1,70	0,58	1,94	0,56	2,00	0,57	1,79	2,36	0,01	0,11	
Wada3	6,87	10,61	6,57	10,59	6,82	9,37	7,47	7,58	7,59	7,86	7,47	7,88	7,17	9,03	7,14	8,99	16,13	0,29	0,95	
Wtransport 3	0,01	0,05	0,01	0,05	0,01	0,05	0,01	0,05	0,01	0,05	0,01	0,05	0,01	0,05	0,01	0,05	0,06	0,00	0,00	
Tanque V	1,74	1,75	1,98	1,47	2,17	1,37	1,95	1,30	1,87	1,12	2,35	0,74	1,76	1,54	1,97	1,33	3,30	0,16	0,24	
P04	3,00	3,62	2,95	4,32	3,29	3,41	2,99	2,84	3,09	2,24	3,05	2,75	3,08	2,87	3,06	3,15	6,21	0,08	0,51	
Wtransport 4	0,07	0,23	0,06	0,28	0,06	0,28	0,06	0,28	0,06	0,28	0,07	0,30	0,06	0,28	0,06	0,28	0,34	0,00	0,02	
Wtransport 5	0,04	0,26	0,05	0,28	0,05	0,28	0,05	0,28	0,05	0,32	0,05	0,28	0,05	0,28	0,05	0,28	0,33	0,00	0,01	
Tanque O	0,20	3,24	0,26	3,12	0,18	3,15	0,29	3,20	0,24	2,89	0,22	2,92	0,18	3,29	0,22	3,12	3,34	0,03	0,11	
Tanque P	0,00	0,84	0,00	0,84	0,00	0,80	0,00	0,84	0,00	0,84	0,00	0,84	0,00	0,84	0,00	0,83	0,83	-	0,01	
Wada 2	1,16	2,96	1,24	2,61	1,12	3,01	1,30	2,33	1,28	2,54	1,22	2,98	1,23	3,26	1,22	2,81	4,03	0,05	0,24	
Wtransport 6	0,09	0,42	0,11	0,49	0,11	0,49	0,11	0,44	0,11	0,53	0,11	0,44	0,11	0,49	0,11	0,47	0,58	0,01	0,03	
Wtransport 7	0,10	0,16	0,08	0,21	0,07	0,28	0,08	0,26	0,08	0,26	0,07	0,28	0,08	0,26	0,08	0,24	0,32	0,01	0,03	
Wtransport 8	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,04	0,00	0,00	
Tanque H	0,11	0,68	0,11	0,56	0,11	0,86	0,11	0,72	0,11	0,67	0,11	0,54	0,12	0,70	0,11	0,68	0,79	0,00	0,08	
Wtransport 9	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,04	0,00	0,00	

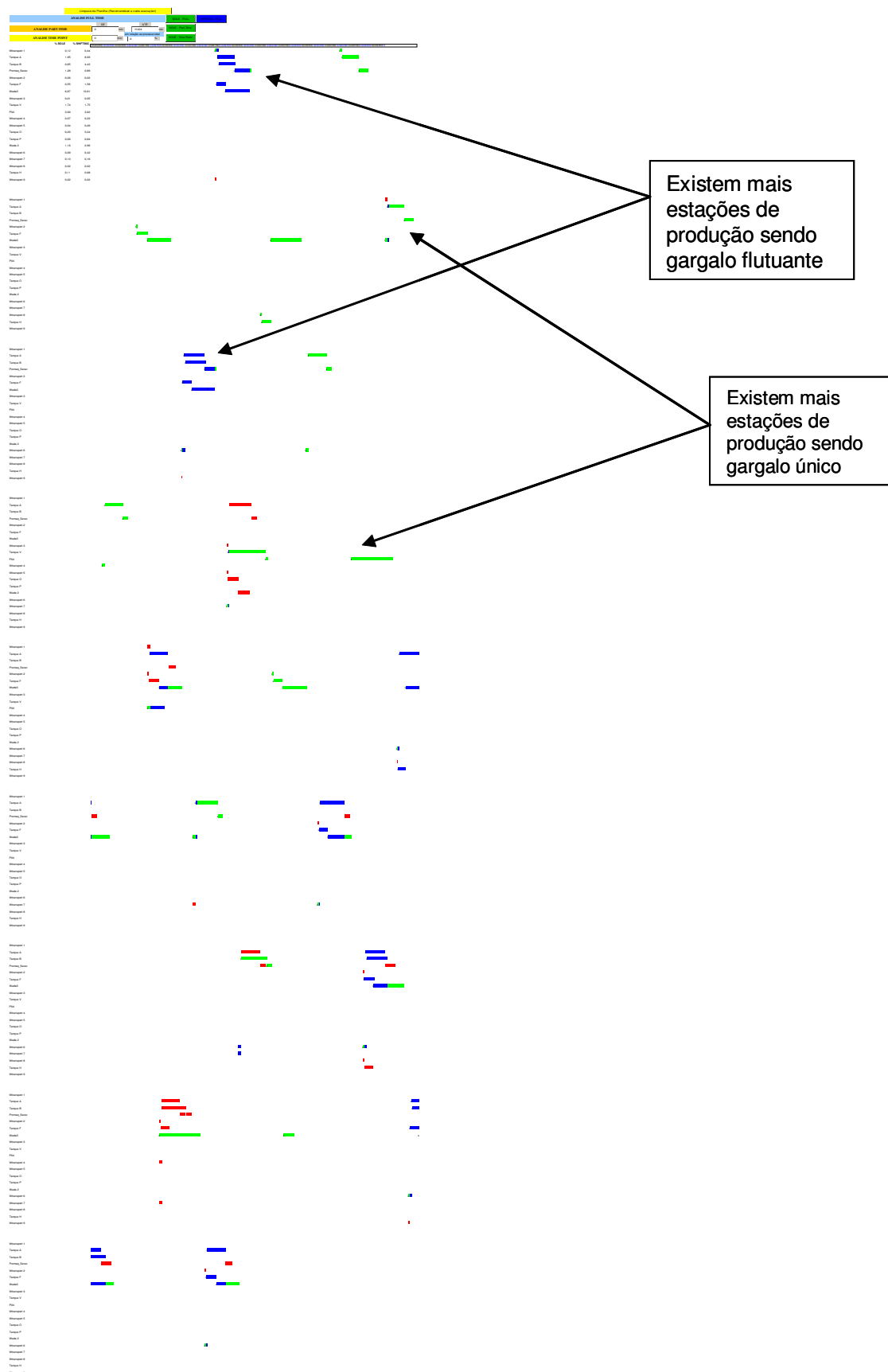


FIGURA B.1 – GRÁFICO DE GARGALOS FLUTUANTES (MODELO REDUZIDO)