

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

DESENVOLVIMENTO DE METODOLOGIA COMPUTACIONAL PARA  
DETERMINAÇÃO DE GARGALOS PRODUTIVOS – ANÁLISE DE CASO

por

Neimar Rodrigues de Freitas

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, Dezembro de 2009



**Universidade Federal do Rio Grande do Sul**

**Escola de Engenharia**

**Departamento de Engenharia Mecânica**

DESENVOLVIMENTO DE METODOLOGIA COMPUTACIONAL PARA  
DETERMINAÇÃO DE GARGALOS PRODUTIVOS – ANÁLISE DE CASO

por

Neimar Rodrigues de Freitas

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS REQUISITOS PARA A  
OBTENÇÃO DO TÍTULO DE  
**ENGENHEIRO MECÂNICO**  
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Dr. Walter Jesus Paucar Casas  
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Projeto e Fabricação**

Orientador: Prof. Dr. José Antônio Esmerio Mazzaferro

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. Flávio José Lorini

Prof. Martin Geier

Prof. Liciane Sabadin Bertol

Porto Alegre, 04 de Dezembro de 2009.

*Dedico este trabalho a meus pais, Danilo e Teresinha (in memoriam).*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço as respectivas pessoas e entidades sem as quais não seria possível chegar a este trabalho:

- Aos meus familiares, dos quais sempre tive apoio incondicional ao longo da minha trajetória.

- A minha namorada Camila que esteve presente em praticamente todos os momentos da minha vida durante a passagem pelo curso.

- Aos meus amigos que sempre estiveram presentes nos momentos em que precisei.

- Ao Departamento da Engenharia Mecânica da UFRGS por todo conhecimento que me foi fornecido e pelas oportunidades por ele criadas.

- A General Motors, de modo especial ao setor de Funilaria da Planta de Gravataí onde adquiri conhecimentos imprescindíveis para minha vida profissional e especialmente para a realização deste trabalho.

- A Braskem S/A, de modo especial ao setor de Engenharia de Manutenção e Confiabilidade da UNIB/RS onde muito aprendi e cresci pessoal e profissionalmente ao longo do estágio realizado.

FREITAS, N. R. **Desenvolvimento de metodologia computacional para determinação de gargalos produtivos – Análise de caso.** 2009. 37 p. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

## RESUMO

Este trabalho descreve o desenvolvimento de um simulador escrito em linguagem C para a análise de linhas de produção. O simulador utiliza como parâmetros de entrada dados obtidos através das médias de tempos da linha. Além disso, o trabalho analisa duas diferentes metodologias para determinação desses dados, uma baseada no Tempo de Ciclo Médio e outra baseada no *Takt Time* da linha de produção. A lógica do simulador é exposta e é simulado o caso de uma célula de uma indústria automotiva. Os resultados obtidos pelo simulador criado são confrontados com os resultados obtidos através do simulador comercial CMORE e com os valores reais da linha. A capacidade de produção da linha simulada através do código criado obtém um erro de 0,873% para a metodologia baseada no Tempo de Ciclo Médio e um erro de 1,545% para a metodologia do *Takt Time*. Estes erros mostram-se menores que os das simulações realizadas através do CMORE e demonstram a viabilidade do simulador.

**PALAVRAS-CHAVE:** simulação computacional, linha de produção, tempo de ciclo médio, CMORE

FREITAS, N. R. **Development of computational methodology to determine production bottlenecks - A case report.** 2009. 37 p. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

## ABSTRACT

This paper describes the development of a simulator written in C language for the analysis of production lines. The simulator input data parameters considered are the average times of the line under study. In addition, the paper analyzes two different methodologies for determining these data, one based on the Average Cycle Time and the other based on the Takt Time of the production line. The logic of the simulator is explained and is simulated the case of a cell of an automotive industry. The results obtained by the simulator are confronted with the results obtained by the commercial simulator CMORE and with the real values of the line. The production capacity of the line is simulated using the code created resulting in an error of 0.873% for the methodology based on Average Cycle Time and an error of 1.545% for the methodology of Takt Time. These errors are shown to be smaller than those of simulations produced by CMORE and demonstrate the feasibility of the simulator.

**KEYWORDS:** computer simulation, production line, average cycle time, CMORE

## -SUMÁRIO

	Pág.
1 INTRODUÇÃO .....	1
2 OBJETIVOS .....	1
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	1
3.1 O processo produtivo .....	1
3.1.1 Revolução industrial .....	1
3.1.2 Linha de produção.....	2
3.1.3 Teoria das Restrições.....	2
3.2 Análise de sistemas produtivos .....	3
3.2.1 Definição de conceitos .....	3
3.3 Os quatro estados de uma estação.....	4
3.4 Simulação computacional de sistemas produtivos .....	6
4 METODOLOGIA UTILIZADA.....	6
4.1 Linha de produção analisada .....	6
4.2 Coleta de dados.....	7
4.3 Utilização de médias .....	8
4.3.1 Diferentes abordagens .....	8
4.3.2 Estimativa para o <i>Stand Alone Throughput</i> – SAT .....	10
4.4 Programa desenvolvido.....	11
4.4.2 Configurações utilizadas para simulação.....	12
5 RESULTADOS OBTIDOS .....	14
5.1 Resultados obtidos através do simulador desenvolvido .....	14
5.1.1 Análise da linha de produção completa .....	14
5.1.2 Análise da estação AD40M+AD40 .....	16
5.1.3 Análise da estação AD20M .....	18
5.2 Resultados da análise obtidos através do CMORE .....	18
5.3 Comparação dos valores de capacidade de produção .....	19
6 CONCLUSÕES .....	20
7 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS .....	20
8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	21
9 APÊNDICES.....	22
9.1 Código fonte do simulador .....	22
9.2 Arquivo de entrada de dados para o simulador - análise linha completa.....	27
9.3 Saída resumida gerada pelo simulador - análise da linha completa .....	28

## 1 INTRODUÇÃO

O cenário da economia atual exige que as empresas sejam cada vez mais competitivas e eficiência torna-se uma palavra de ordem em todo o lugar. A utilização da linha de produção como sistema de manufatura torna-se padrão entre praticamente todas as empresas que buscam melhorar seus resultados. Produzir cada vez mais com menos recursos torna-se inevitável.

Neste contexto o engenheiro figura como o principal responsável por tornar o ambiente fabril um local mais enxuto, produtivo, ágil e com capacidade de resposta cada vez maior. Para tanto o engenheiro utiliza diversas ferramentas, dentre elas uma das mais utilizadas atualmente é a simulação computacional.

A simulação computacional faz com que o engenheiro consiga, de forma rápida e precisa, analisar resultados sobre o sistema em questão e sobre este tomar iniciativas para otimizá-lo. Aperfeiçoar a simulação computacional de linhas de produção, tornando-a uma ferramenta de fácil compreensão e aplicação é a idéia central deste trabalho.

Cabe ressaltar que uso do simulador por si só não obtém melhorias na produtividade e eficiência da linha. Aliado a ele existe a necessidade de uma metodologia de melhoria contínua nos processos da empresa onde se pretende aplicá-lo objetivando melhorias de capacidade de resposta e redução de custos. Ferramentas como 6Sigma, Ciclo PDCA (Plan, Do, Check, Act), FMEA (Failure Mode and Effects Analysis) análises de confiabilidade dos equipamentos, entre outras também devem ser utilizadas.

## 2 OBJETIVOS

O principal objetivo deste trabalho é o desenvolvimento de uma metodologia capaz de simular o fluxo de materiais em uma linha de produção. Para isso, faz-se uso da Teoria das Restrições e de diferentes conceitos para o tratamento dos dados de tempos de ciclo de cada estação de trabalho de uma determinada célula. A finalidade desta simulação é determinar a posição dos gargalos produtivos através da análise dos resultados relativos a este fluxo.

Para realização da simulação é criado um programa computacional na linguagem C baseado nesta metodologia. Este simulador é aplicado a uma célula automatizada de uma indústria automobilística e os resultados obtidos são comparados a um programa já validado e utilizado por esta empresa. Os resultados também são comparados aos dados reais de produção desta célula. Esta comparação visa a validação da metodologia para este caso.

Os dados de entrada a serem utilizados pelo simulador, em forma de médias, objetivam facilitar e difundir o uso de programas computacionais para a análise de linhas de produção em todos os níveis da empresa. Isto é facilitado pelo fato destes dados serem de fácil obtenção, mesmo em linhas de produção não automatizadas.

## 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 3.1 O processo produtivo

#### 3.1.1 Revolução industrial

A revolução industrial ocorreu na Grã-Bretanha no século XVIII. A partir de então surgiu o que hoje se chama de indústria. O início do processo ocorreu entre 1780 e 1830 e em seguida difundiu-se em outros países. Um dos principais fatores para o início desta revolução foi a criação de inventos que acarretaram fortes efeitos econômicos, como por exemplo: a máquina a vapor, os teares mecânicos de fiação, a máquina de despoldamento do algodão, a locomotiva e a estrada de ferro. A inserção desses inventos permitiu a implantação de



manufaturas e usinas, abalando assim a exploração artesanal das oficinas familiares existentes na época [Moreira, 1998].

A expansão do processo de industrialização ocorreu primeiramente para a Europa continental no século XIX, difundindo-se nos EUA e no Japão na segunda metade do século XIX, chegando à América Latina e em alguns países asiáticos durante o século XX. No Brasil o processo de industrialização ganhou maturidade entre os anos 40 e 50.

### 3.1.2 Linha de produção

Após vários séculos do princípio da revolução industrial, um americano de nome Henry Ford cria um novo conceito para produção de bens manufaturados, sendo este aplicado em sua fábrica de automóveis, a Ford Motors Company (1903), que se tornaria a empresa mais poderosa dos EUA anos mais tarde [Moreira, 1998].

O conceito da linha de produção foi criado inspirado nas correias transportadoras de abatedouros. Ford na época, ao observar o processo de corte de animais, percebeu que se cada operário fosse altamente qualificado para realizar apenas uma única tarefa, ao invés de dominar todo o processo, seria muito mais produtivo. Junto a isso Ford também percebeu que se a produção de uma fábrica fosse limitada a um único modelo construído em massa ocorreria o aumento da produtividade da mesma.

Em meados de 1970 surge uma nova concepção da linha de produção, o sistema Toyota. Este sistema é baseado em uma linha de produção flexível em relação ao mercado, produzindo somente o necessário e obtendo assim uma redução no volume de estoques em relação ao sistema proposto inicialmente por Ford [Moreira, 1998].

Este novo sistema introduz novos conceitos na linha de produção como a multifuncionalização da mão de obra que consiste na capacitação do operador para realizar diversas tarefas na linha de produção, os sistemas de qualidade total que implementa diversas verificações da qualidade do produto ao longo da linha e o sistema Just In Time que visa produzir somente o necessário, na quantidade necessária e no momento necessário. Este sistema foi amplamente difundido e é utilizado na maior parte das indústrias manufatureiras.

### 3.1.3 Teoria das Restrições

A teoria das restrições surgiu pela primeira vez por meio da obra “A Meta”, montada tipo novela, em 1984, sendo esta traduzida em vários idiomas. A teoria explora algo que até então era ignorado pelos métodos de manufatura existentes: dependências e variabilidades. Os conceitos de dependência e variabilidade são aplicáveis nas mais diferentes atividades que uma empresa realiza [Rubio, 2002], porém neste trabalho estes são apresentados com o foco na análise de uma linha de produção.

A dependência relaciona as diferentes estações de trabalho dispostas seqüencialmente na linha de produção. Ela se faz presente no momento em que a estação de trabalho que está sendo analisada não pode iniciar uma nova tarefa por causa da estação anterior que ainda não acabou a sua operação. O mesmo conceito é válido para uma estação subsequente, se a estação posterior não tiver acabado o seu trabalho a estação analisada não consegue repassar o já terminado adiante.

A variabilidade representa as flutuações estatísticas e randômicas ocorridas invariavelmente em um processo de produção. No caso aplicado a este estudo pode representar a quebra de algum equipamento da estação, a falha de um operador ao realizar a sua atividade, a falta de um determinado componente na montagem de um sistema, entre tantos outros fatores que podem ocasionar a parada de um equipamento afetando assim a linha de produção como um todo.

A teoria das restrições demonstra o impacto ocasionado através da análise destes conceitos sobre uma determinada linha de produção mostrando que se, as mesmas não forem analisadas, a planta terá um aumento desnecessário de material em processo (inventário), tempos alargados da produção e capacidade de produção ociosa, levando a um aumento nas despesas e prejudicando as saídas [Goldratt, 1991].

Estes conceitos levam ao foco da teoria das restrições que mostra que o importante não é ter uma linha de produção com capacidade balanceada, mas sim com o fluxo de

materiais entre as estações sincronizados. A análise desta sincronia leva ao conceito de estação gargalo.

A estação gargalo é a estação cuja capacidade de produção é igual a do conjunto (célula) onde a mesma está inserida, ou seja, o ritmo de produção da linha é determinado pelo ritmo de trabalho do gargalo. Disso vem a necessidade de determinar o gargalo produtivo a fim de, uma vez despendido esforços para aumentar a capacidade da linha, obter um real ganho na saída do sistema. Qualquer esforço aplicado sobre uma estação de trabalho não-gargalo implicará em ganhos pequenos ou inexistentes [Rubio, 2002].

Esta definição para a estação gargalo vem em contraponto a visão predominante das empresas que aponta como operações gargalo as estações que possuem um tempo de ciclo muito elevado para executar um trabalho ou as que levam muito tempo para serem reparadas quando entram em falha.

Para promover uma melhora em um sistema produtivo, a teoria das restrições se baseia em cinco passos [Goldratt, 1998].

1. Identificar os gargalos do sistema
2. Decidir como explorar este gargalo
3. Subordinar todas as outras operações a operação gargalo
4. Ampliar, se necessário, a capacidade do gargalo
5. Se, nas etapas anteriores, um gargalo foi eliminado, voltar para o primeiro passo.

É importante lembrar que, apesar da sua simplicidade, a teoria das restrições ainda hoje não está totalmente difundida nas empresas. A mudança de paradigmas propostas por ela encontra várias barreiras a serem superadas. O escopo deste trabalho está justamente voltado a tentar, através da criação do programa para simulação de gargalos por meio de médias, tornar a aplicação deste conceito mais simples e prática para os níveis mais baixos da produção (chão-de-fábrica).

## **3.2 Análise de sistemas produtivos**

### **3.2.1 Definição de conceitos**

Para iniciar a análise de um sistema produtivo é preciso inicialmente entender alguns parâmetros importantes para a caracterização do mesmo [Toledo Junior, 2007] [Pinto, 2008] [Goover, 1987].

#### *3.2.1.1 Estação de trabalho*

Uma estação de trabalho é definida por uma operação, ou uma seqüência de operações, realizada em um determinado espaço físico. Uma estação de trabalho pode ser uma máquina, uma bancada, um conjunto de máquinas, entre outras. Na concepção é uma entidade que recebe um determinado material, realiza algum processo sobre o mesmo e repassa-o adiante.

#### *3.2.1.2 Célula*

Um conjunto de estações de trabalho é denominado célula de trabalho.

#### *3.2.1.3 Takt time*

É o tempo disponível para a produção dividido pela demanda, ou seja, é o tempo de ciclo exigido de uma determinada estação de trabalho de modo a atingir as metas de produção.

### 3.2.1.4 Tempo de Ciclo Médio - TCM

O tempo de ciclo médio corresponde ao tempo médio que cada estação de trabalho necessita para realizar sua operação. Este valor é obtido através da média de todos os ciclos realizados pela estação. Neste trabalho esta variável é designada pela sigla TCM.

### 3.2.1.5 Tempo de transporte

É o tempo necessário para ocorrer a movimentação do material que está sendo processado de uma estação de trabalho a outra em condições normais de operação. Este tempo é obtido através dos tempos de ciclos somados de duas estações de trabalho sequenciais, excluindo-se os tempos de processamento do material.

### 3.2.1.6 Falha

Representa o estado da estação de trabalho que não está em uma condição normal de funcionamento. Pode ocorrer por razões diversas como quebra do equipamento, atraso do operador, falta de material, dentre outras. Em cada ciclo que uma estação ultrapassa o valor de TCM considera-se que a estação esteja com algum problema para terminar o ciclo de trabalho, logo se assume que a mesma tenha entrado em falha. Também conhecida pelo termo em inglês – *Downtime*.

### 3.2.1.7 Tempo Médio de Reparo - TMR

O Tempo Médio de Reparo é obtido somando-se todos os tempos de reparo ocorridos na estação durante o período em que é feita a análise dividida pela quantidade de ciclos falhos da estação (3.1). Esta média é designada no trabalho por sigla TMR.

$$TMR = \frac{\text{Downtime Total}}{\text{N}^\circ \text{ de Ciclos com Falha}} \quad (3.1)$$

### 3.2.1.8 Média de Ciclos Entre Falhas - MCEF

A Média de Ciclos entre Falhas é dada pela divisão entre o total de ciclos realizados durante o período analisado e o total de ciclos falhos ocorridos na estação (3.2). Esta média é designada neste trabalho pela sigla MCEF.

$$MCEF = \frac{\text{Total de Ciclos}}{\text{Total de Ciclos com Falha}} \quad (3.2)$$

### 3.2.1.9 Stand Alone Throughput – SAT

O *Stand Alone Throughput* – SAT é definido como a capacidade de produção de uma estação por ela mesma, ou seja, é o quanto uma estação produziria se ela não estivesse inserida em uma linha de produção, recebendo um estoque infinito de material a ser processado e dispondo de um local de armazenagem de produtos também infinito. O fato de a estação estar localizada em uma linha de produção a deixa sujeita a paradas por conta das outras estações da linha ou por falta de material, sendo então o valor de SAT somente um referencial.

## 3.3 Os quatro estados de uma estação

Analisando um trecho de uma linha de produção identifica-se quatro estados possíveis para uma estação de trabalho em uma linha de produção [Cassidy, 1999] [Groover, 1987]. Para entendimento destes conceitos é utilizada a análise de uma situação hipotética

onde existem três estações de trabalho seqüenciais definidas por: A, B e C. Cada uma destas estações realiza uma determinada operação e uma depende da outra para continuar o trabalho. Este sistema é comumente encontrado nas indústrias e é simples encontrar exemplos práticos para comparação.

Uma vez em andamento o processo de produção somente quatro estados são possíveis para as estações de trabalho:

1. A estação está operando normalmente.
2. A estação parou de funcionar por alguma falha dela mesma.
3. A estação acabou o trabalho e não pode iniciar um novo ciclo por estar bloqueada pela estação seguinte que pode estar em estado de falha ou ainda processando o material.
4. A estação acabou o trabalho, enviou-o a frente e não pode iniciar um novo ciclo por estar aguardando o recebimento de material da estação anterior que pode estar em estado de falha ou ainda processando o material.

É fácil perceber que qualquer outro estado para a estação é uma composição destes quatro estados. A partir destes quatro estados surge a definição de:

1. Estação trabalhando (estado 1)
2. Estação parada em falha (estado 2)
3. Estação bloqueada (estado 3)
4. Estação esperando material (estado 4)

A utilização destes termos é utilizada para melhor entendimento dos assuntos a serem debatidos a seguir. A Figura 3.1 apresenta os quatro estados de uma estação de trabalho. O bloco na cor verde representa que a estação está ainda executando o trabalho, na cor amarela representa que a estação já finalizou o trabalho e na cor vermelha representa que a estação está em estado de falha. Os blocos a e b representam a estação A nos dois primeiros estados e os dois blocos seguintes (c e d) representam a estação B no terceiro e quarto estados.

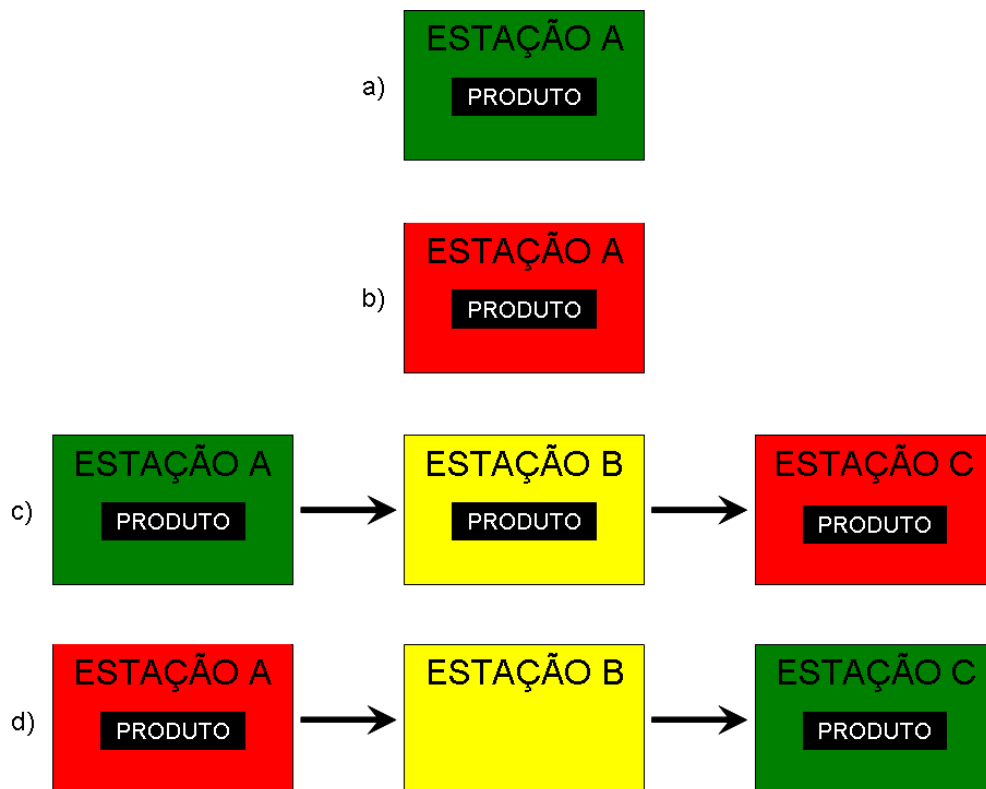


Figura 3.1 – Os quatro estados de uma estação

### 3.4 Simulação computacional de sistemas produtivos

Assim como em outros casos de análise de problemas de engenharia, a forma que apresenta um melhor custo-benefício para análise de sistemas produtivos é a simulação computacional. Geralmente a simulação computacional fornece resultados bastante precisos e com um custo relativamente baixo se comparado a outros métodos possíveis.

Dentre os benefícios da simulação computacional em análises de sistemas de manufatura pode-se salientar alguns [Law e Kelton, 1991]:

1. Aumento da capacidade produtiva
2. Redução do inventário em processo
3. Aumento da utilização de mão de obra e de maquinário
4. Redução dos tempos de entrega de produtos
5. Redução de custos
6. Maior confiabilidade no projeto de sistemas
7. Maior entendimento do sistema

Diversos são os programas de simulação computacional disponíveis para análise de sistemas produtivos. Dentre os mais utilizados pode-se destacar o Arena da Rockwell Automation e o ProModel da ProModel Corporation [Law e Kelton, 1991]. A empresa que está sendo analisada neste trabalho utiliza para simulação de seus sistemas produtivos o simulador CMORE, o qual foi desenvolvido pela GM Tech Center e é utilizado por diversas empresas.

O primeiro passo para utilização do programa é a criação de um modelo que consiga refletir o que ocorre na situação real do processo. Uma vez criado o modelo alguns dados devem ser fornecidos ao programa para realização da simulação. No caso, para cada estação de trabalho devem ser fornecidos alguns dados básicos como o tempo de ciclo médio - TCM, o tempo médio de reparo - TMR e a média de ciclos entre falhas - MCEF. Feito isso, executando-se o simulador o mesmo fornece a capacidade de produção da linha em questão e um ordenamento das estações-gargalos com os respectivos ganhos possíveis de cada uma.

Apesar da lógica do simulador não ser conhecida, sabe-se que para determinar o ganho de cada estação de trabalho, e conseqüentemente o potencial da mesma vir a ser um gargalo, o programa executa uma simulação com todas as estações presentes na linha. Na seqüência ele elimina a primeira estação de trabalho do modelo e executa novamente a simulação. A diferença entre a capacidade produtiva obtida pelo modelo com todas as estações e a capacidade produtiva obtida com o modelo sem a primeira estação é o quanto se pode ganhar na primeira estação [Longcore, 1999]. Esta lógica é aplicada através de um método iterativo para todas as estações e ao final é realizado um ordenamento dos maiores ganhos visando determinar o gargalo do sistema.

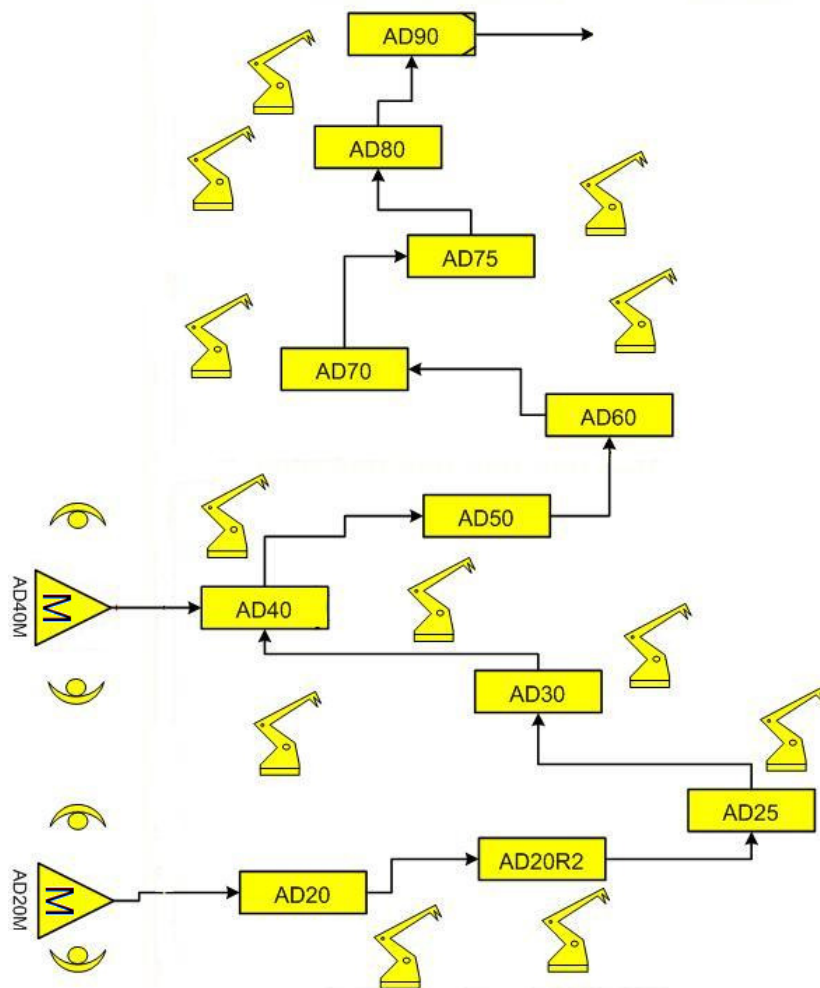
A simulação computacional recorrentemente é aplicada para determinação de gargalos visando aumentar a capacidade produtiva de uma célula, porém existem outras aplicações para o simulador, como por exemplo, o sincronismo do fluxo de material pelas estações de trabalho. Através da análise dos tempos de ciclo, espera, bloqueio e falhas pode-se submeter todas as estações da linha ao ritmo do gargalo, sincronizando a mesma. Este sincronismo leva a uma redução do inventário em processo, aumento da vida útil dos equipamentos, redução de custos e redução de ciclos com falha ocorridos nas estações [Goldratt, 1991].

## 4 METODOLOGIA UTILIZADA

### 4.1 Linha de produção analisada

A célula de produção a ser analisada consiste em uma seqüência de estações de trabalho e é bastante automatizada. São onze estações de trabalho seqüenciais na qual robôs

realizam operações de solda (AD20, AD20R2, AD30, AD40, AD50, AD60, AD70, AD75, AD80 e AD90). Além destas onze estações existem outras duas constituídas de operações manuais de abastecimento de peças e realização de alguns pontos de solda (AD20M e AD40M). Entre as estações de trabalho não existem locais de armazenamento de produtos em operação e o transporte de uma estação para outra é realizado através dos robôs. O modelo esquemático da célula analisada é representado pela Figura 4.1, onde as estações manuais são representadas por triângulos e as estações automáticas são representadas por retângulos. Vale ressaltar que inexistem locais para armazenamento de peças entre as estações e que, na análise de ambos simuladores, peças defeituosas fabricadas no interior da célula não são excluídas da contagem total de produção.



**Figura 4.1 – Modelo da linha de produção analisada**

## 4.2 Coleta de dados

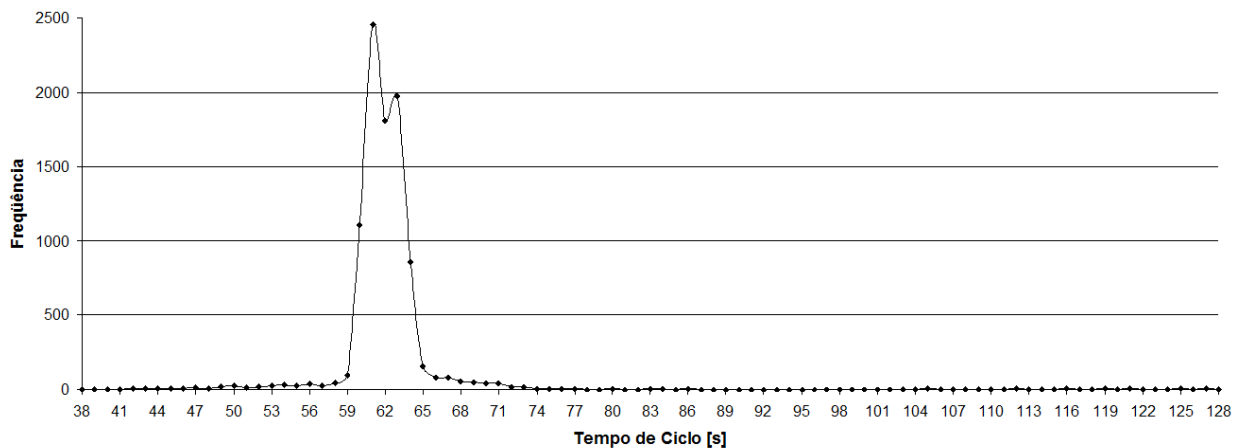
A simulação do sistema começa com a coleta de dados da linha de produção. Os dados de cada uma das estações são a base para se obter, através do simulador, as determinações dos gargalos. Os dados obtidos neste trabalho advêm de uma linha de produção bastante automatizada, sendo assim possível, através dos controles da mesma, obter facilmente os dados de inícios e fins de ciclos de cada uma das estações.

Vale ressaltar que os dados utilizados neste trabalho representam os tempos de cada uma das estações referentes ao seu ciclo de trabalho, admitindo o tempo de transporte entre as mesmas como sendo fixo e isento de falhas. O programa é capaz de analisar estes

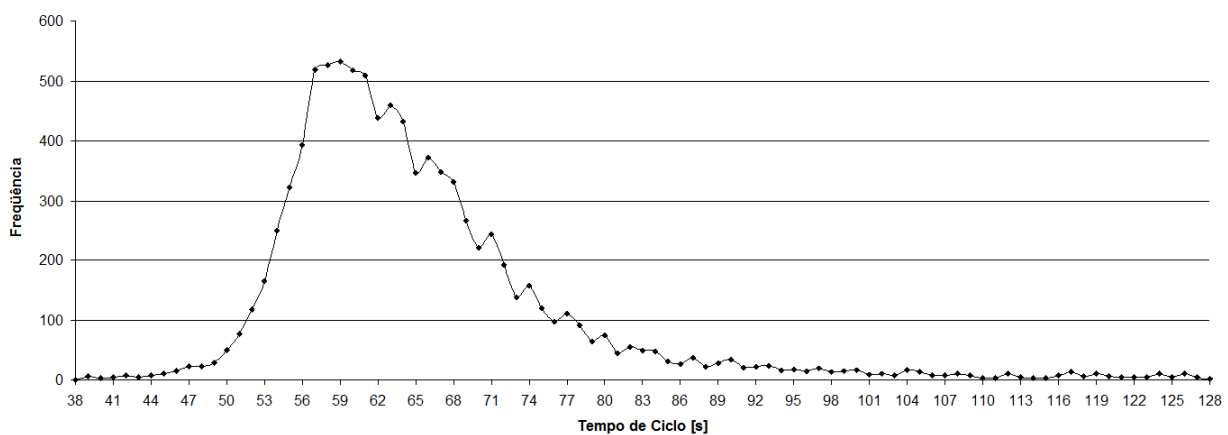
tempos como sendo independentes, porém como os dados obtidos não contemplam esta possibilidade, esta análise não foi feita.

### 4.3 Utilização de médias

Apesar do elevado nível de automação encontrado na célula analisada pode-se observar que os tempos de ciclo encontrados não são constantes. Observando os dados percebe-se que existe uma variação entre os valores de tempos de ciclo. A Figura 4.2 mostra o histograma com dados oriundos da estação AD75, uma estação automatizada. Já a Figura 4.3 mostra o histograma com dados da estação AD40M que consiste em uma das operações manuais da linha. Com este exemplo pode se perceber claramente a diferença entre uma estação automatizada e uma estação que envolve operações manuais.



**Figura 4.2 – Histograma estação AD75**



**Figura 4.3 – Histograma estação AD40M**

Mesmo tendo os tempos de ciclo na forma exposta, tratar o problema através da utilização de médias de tempos de ciclo, de tempos de reparo e de ciclos entre falhas torna mais simples a abordagem do problema. Lembrando que um dos escopos deste trabalho consiste em analisar a viabilidade da utilização de dados na forma de médias para retratar o problema. A Figura 4.4 mostra mais claramente como ficam os dados tratados através deste conceito.

#### 4.3.1 Diferentes abordagens

Para o uso de médias é necessário primeiramente determinar alguns parâmetros a serem utilizados para calcular os valores. O método proposto por este trabalho consiste em utilizar como base para cálculo do tempo médio de reparo (TMR) e da média de ciclos entre

falhas (MCEF) o Tempo de Ciclo Médio da estação de trabalho. Na empresa onde se encontra a célula em questão a metodologia empregada é diferente: como base de cálculo para o TMR e da MCEF da estação de trabalho utiliza-se o *Takt Time* da linha de produção, cujo valor era de 66s na ocasião. Na Figura 4.5 é mostrado o ciclo de uma estação de trabalho genérica, onde as setas azuis apontam os momentos em que a estação entrou em falha com base no Tempo de Ciclo Médio e as vermelhas apontam o mesmo com base no *Takt Time*. Além disso, pode-se perceber a diferença de tempos considerados *downtime* para cada um dos métodos. É importante ressaltar que para ambos os métodos o valor utilizado como tempo de ciclo da estação é o tempo de ciclo médio (TCM).

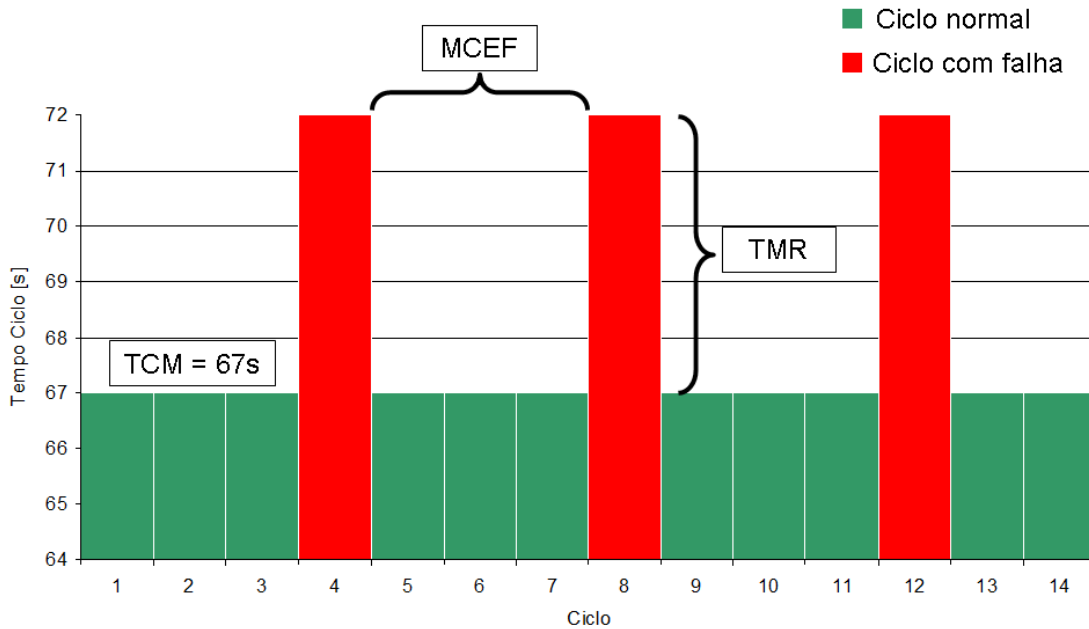


Figura 4.4 – Conceitos de TCM, TMR e MCEF

As simulações foram realizadas utilizando-se as duas abordagens com fins de verificar qual se aproxima mais da situação real da linha. Os dados utilizados para as simulações são referentes a produção ocorrida entre os dias 5 e 22 de maio de 2008 para dois turnos de trabalho. Neste período da coleta de dados não foi realizada nenhuma mudança significativa na linha. Sobre os dados aplicou-se um filtro de dois desvios padrão a partir da média para valores maiores e dois desvios padrão para valores menores de tempos de ciclo, visando refinar a análise do problema. Com este filtro 95,4% dos dados válidos são abrangidos.

Os dados utilizados nas simulações estão descritos na Tabela 4.1.

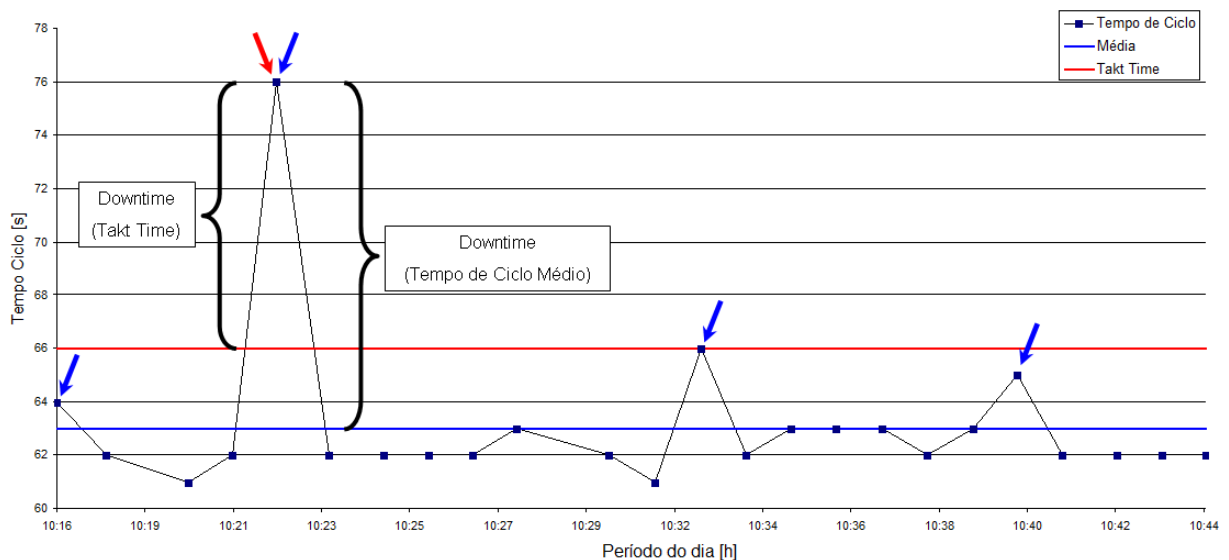


Figura 4.5 – Diferentes abordagens para determinação de TMR e MCEF



Tabela 4.1 – Dados utilizados na simulação

ESTAÇÃO	BASE TAKT TIME			BASE TEMPO DE CICLO MÉDIO		
	TCM [s]	TMR [s]	MCEF [ciclos]	TCM [s]	TMR [s]	MCEF [ciclos]
AD20M	34,92	32,26	30,48	34,92	21,67	6,64
AD20	65,83	6,92	14,24	65,83	7,09	14,24
AD20R2	62,69	5,52	22,68	62,69	6,33	14,12
AD25	65,35	5,30	14,59	65,35	4,01	9,25
AD30	65,74	5,03	16,41	65,74	5,30	16,41
AD40M	70,23	13,57	2,85	70,23	15,38	4,37
AD40	63,73	5,41	17,57	63,73	6,00	12,75
AD50	64,27	5,96	18,41	64,27	5,27	11,74
AD60	55,64	6,24	222,14	55,64	5,28	18,70
AD70	57,96	6,02	50,97	57,96	6,20	50,97
AD75	63,91	5,79	23,43	63,91	5,43	14,50
AD80	62,60	7,03	21,30	62,60	7,79	14,49
AD90	66,54	5,42	13,38	66,54	6,13	17,16

#### 4.3.2 Estimativa para o *Stand Alone Throughput* – SAT

Através desses dados pode-se obter a primeira informação relevante sobre o sistema – a capacidade de produção da estação por ela mesma – SAT. Uma vez que a análise feita pelo simulador considera a linearidade da linha de produção (linha sem ramificações) pode-se estimar que a estação que tiver o menor valor SAT será a possível candidata a gargalo do sistema. Uma estimativa para o valor SAT, dado em Ciclos Por Hora (CPH) pode ser obtida dividindo-se o valor de uma hora (3600s) pela soma do TCM e o valor de TMR dividido por MCEF. Esta estimativa é dada pela equação (4.1).

$$SAT = \frac{3600}{TCM + \frac{TMR}{MCEF}} \quad (4.1)$$

Na equação o valor de TCM e o TMR são dados em segundos. O valor da MCEF é dado em ciclos. Para as estações de trabalho analisadas os valores obtidos, utilizando as duas abordagens para definição de falha, são mostrados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Valores de SAT para as estações analisadas

ESTAÇÃO	BASE TAKT TIME [CPH]	BASE TEMPO DE CICLO MÉDIO [CPH]
AD20M	100,06	94,28
AD20	54,29	54,28
AD20R2	57,21	57,02
AD25	54,79	54,73
AD30	54,51	54,50
AD40M	48,00	48,82
AD40	56,21	56,07
AD50	55,73	55,62
AD60	64,67	64,38
AD70	61,99	61,98
AD75	56,11	56,00
AD80	57,21	57,02
AD90	53,78	53,82

## 4.4 Programa desenvolvido

### 4.4.1.1 Variáveis de entrada

Para a realização da simulação são necessários o TCM (tempo de ciclo médio, em segundos), o TMR (tempo médio de reparo, em segundos) e o MCEF (média de ciclos entre falhas, em ciclos) de cada estação de trabalho. Outras informações requeridas pelo simulador são o passo de tempo a ser utilizado e o tempo total a ser simulado, também em segundos.

Os dados de TCM, TMR e MCEF são informados através de um arquivo de texto, dispostos nesta respectiva ordem para cada uma das estações de trabalho, sendo que a estação onde inicia a linha de produção é a primeira a ter os dados informados, seguida seqüencialmente pelas próximas até a última. O passo de tempo e o tempo total de simulação são informados na janela de execução do programa. No apêndice pode ser visto o arquivo utilizado para entrada de dados no simulador para análise da linha de produção completa através do método do Tempo de Ciclo Médio.

### 4.4.1.2 Variáveis de saída

As principais variáveis obtidas pelo simulador são: o tempo de falha, o tempo de espera por material e o tempo de bloqueio de cada uma das estações. Estes dados são apresentados na janela de execução do programa no valor integral obtido e no valor percentual em relação ao tempo total simulado. Além disso, o simulador fornece os valores de SAT para cada uma das estações antes de executar a simulação e os tempos de ciclo na saída da célula. A saída gerada pelo simulador para análise da linha de produção completa através do método do Tempo de Ciclo Médio está no apêndice em uma versão resumida.

### 4.4.1.3 Lógica do simulador

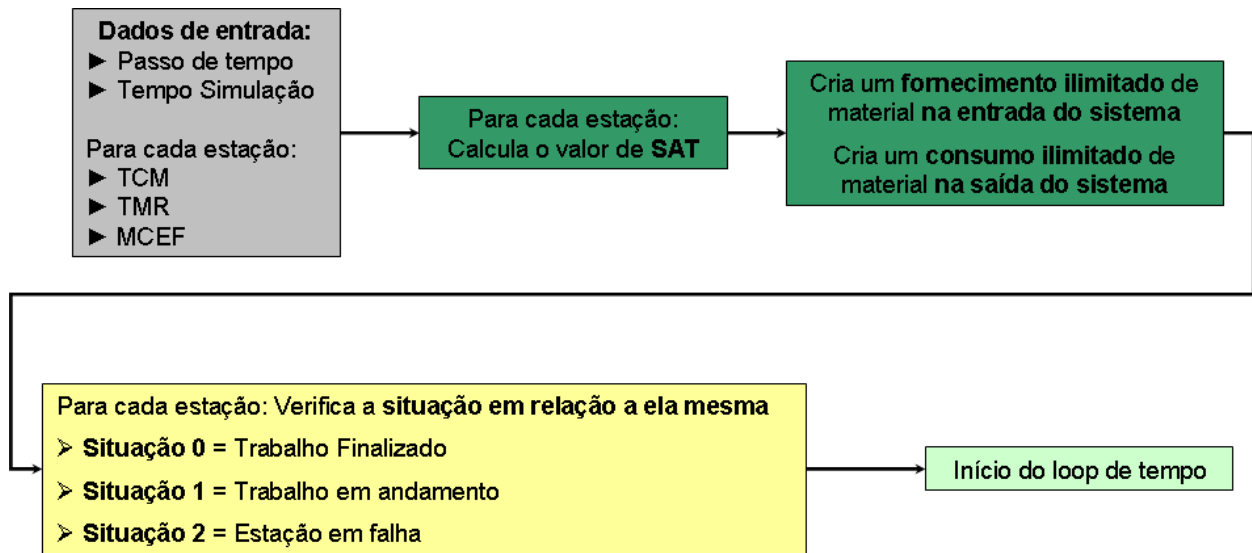
O simulador inicia o processo através da obtenção dos dados de entrada. Após o mesmo realiza a simulação devolvendo os dados de saída. Este aspecto global do simulador é mostrado na Figura 4.6.



Figura 4.6 – Visão geral do simulador

Observando-se o início do processo com um maior detalhamento tem-se primeiramente a obtenção dos dados de entrada, após o simulador realiza o cálculo dos valores SAT para cada uma das estações mostrando-as na tela. Na seqüência o simulador cria no início e no final do sistema duas estações que nunca entram em falha e que possuem TCM aproximadamente nulo. Estas duas estações simulariam uma situação ideal de fornecimento de material para a primeira estação de trabalho da célula e de consumo para a última estação da célula.

Após o simulador realiza um teste para cada estação visando verificar se a mesma finalizou o trabalho, se ela está ainda trabalhando ou se ela está em estado de falha. Este teste somente verifica a situação da estação em relação a ela mesma. Feito os passos anteriores, o simulador segue para a execução de um *loop* de tempo. A Figura 4.7 mostra mais detalhadamente o início do processo.



**Figura 4.7 – Início do simulador**

O *loop* de tempo pode ser considerado como o núcleo principal do programa, pois é nele que são obtidos os valores das variáveis de saída. A lógica embutida no *loop* de tempo faz a comparação entre cada estação de trabalho com as estações vizinhas a esta. Entende-se por estação vizinha como sendo a estação localizada imediatamente anterior e posterior a estação analisada. Para a análise no simulador faz-se uso de um quinto estado da estação de trabalho não citado anteriormente. Este estado representa a situação onde uma estação de trabalho finaliza uma operação e fica em estado de bloqueio ou de espera por conta de uma estação não-vizinha. Este artifício é utilizado visando não penalizar uma estação vizinha que terminou suas operações e está bloqueada ou em espera por outra. Este caso é tipicamente encontrado em linhas de produção e é usualmente designado com sendo uma “bolha” na linha.

Baseado nos valores obtidos para as situações das estações o simulador executa determinadas ações sobre as variáveis da estação de trabalho, de acordo com os quatro estados possíveis para a mesma. O *loop* de tempo cessa ao atingir o valor máximo designado pelo usuário no princípio da simulação. A Figura 4.8 mostra mais claramente o conceito utilizado no simulador. O código fonte do simulador está no apêndice. Vale ressaltar que a utilização do mesmo é livre, contanto que seja feita referência a este trabalho e o autor seja notificado de seu uso.

#### 4.4.2 Configurações utilizadas para simulação

Todas as simulações para análise da linha de produção deste trabalho foram feitas utilizando-se um passo de tempo de 0,5 segundos e um tempo de simulação total de 7.776.000 segundos, que corresponde a três meses de produção ininterruptos. A escolha por estes valores foi feita visando obter um maior refino nos resultados obtidos, uma vez que a precisão da coleta de tempo de ciclo foi de um segundo e o período analisado foi de aproximadamente um mês.

O programa foi executado no sistema operacional Ubuntu v. 9.04 e compilado através do GCC Compiler. O programa mostrou-se bastante leve e, apesar de não terem sido realizados testes, acredita-se que o mesmo não deva encontrar maiores restrições para rodar até mesmo nos computadores pessoais mais simples.

Uma das características do programa é que ele somente é capaz de simular diretamente uma linha de produção contínua e sem ramificações. No entanto a linha de produção analisada neste trabalho possui uma ramificação – a estação AD40M. A solução encontrada para contornar este problema foi considerar como sendo uma linha de produção contínua a seqüência de estações AD40M e AD40. Através da análise dos tempos de ciclo da saída deste conjunto determinou-se um valor de TCM, TMR e MCEF equivalentes para esta linha de produção de duas estações.

A partir destes valores foi realizada a simulação da linha de produção completa, substituindo-se os valores de TCM, TMR e MCEF da estação 40 no modelo pelos valores correspondentes ao conjunto de estações AD40M+AD40. A Figura 4.9 identifica a localização da estação equivalente AD40+AD40 no modelo.

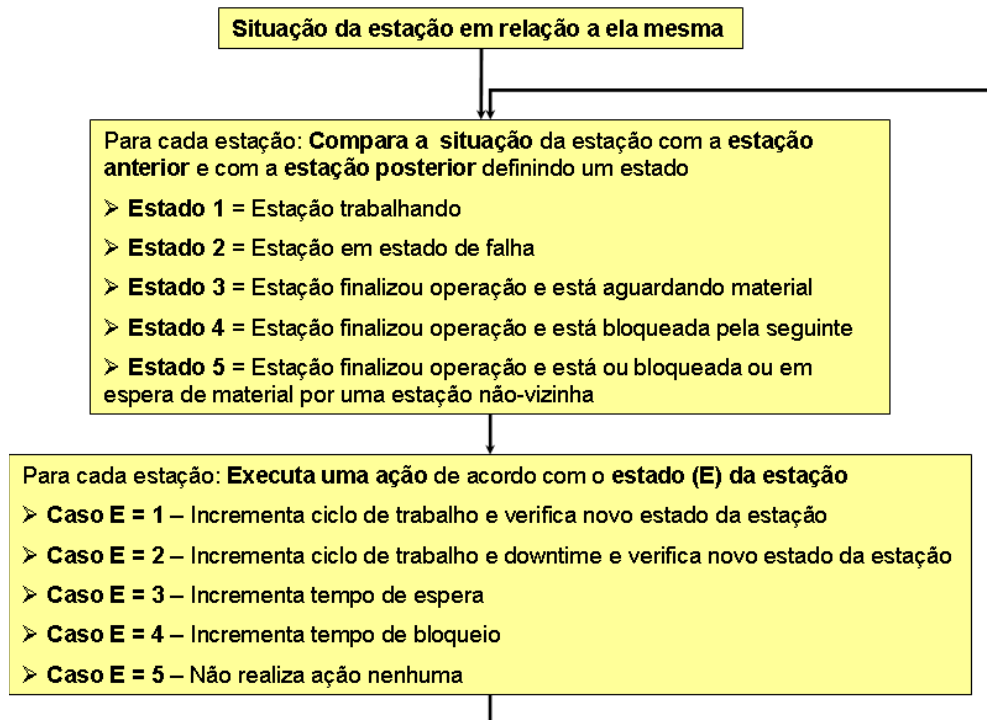


Figura 4.8 – Loop de tempo do simulador

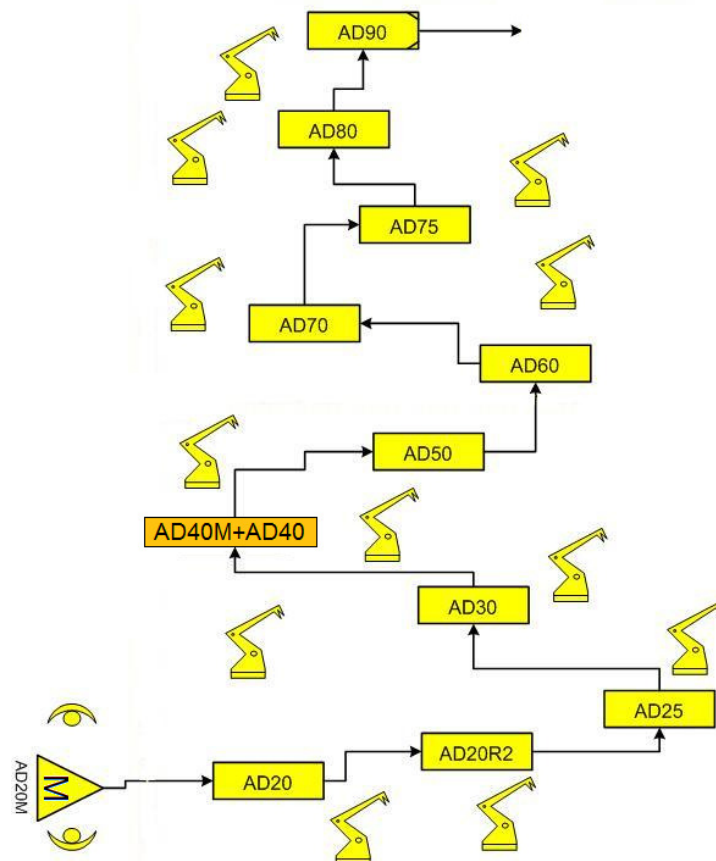


Figura 4.9 – Modelo equivalente para simulação

## 5 RESULTADOS OBTIDOS

### 5.1 Resultados obtidos através do simulador desenvolvido

#### 5.1.1 Análise da linha de produção completa

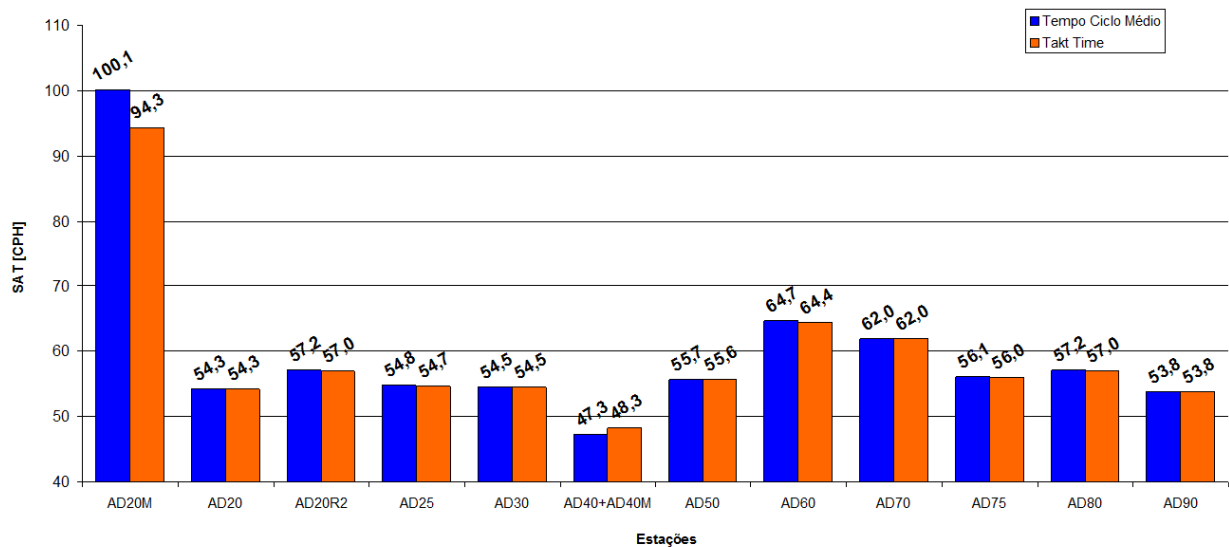
Os resultados obtidos através do simulador criado neste trabalho são apresentados abaixo utilizando a metodologia do Tempo de Ciclo Médio e a metodologia do *Takt Time* apresentadas. Os gráficos obtidos mostram os resultados das duas metodologias lado a lado visando facilitar a comparação entre os dois métodos.

A primeira análise realizada através do simulador foi a da linha de produção equivalente AD4M+AD40. Os dados obtidos para as variáveis TCM, TMR e MCEF através das duas metodologias são mostrados na Tabela 5.1.

**Tabela 5.1 – Dados obtidos da simulação AD40M+40**

	Tempo de Ciclo Médio	Takt Time
<b>TCM [s]</b>	75,000	73,600
<b>MCEF [ciclos]</b>	0,373	0,938
<b>TMR [s]</b>	0,413	0,946
<b>SAT [CPH]</b>	47,301	48,252

Depois de obtidos os valores de equivalência para a ramificação foi feita a simulação da linha de produção completa. A primeira informação retirada do simulador é a estimativa para o *Stand Alone Throughput*. A Figura 5.1 apresenta os resultados obtidos através das duas metodologias.



**Figura 5.1 – Stand Alone Throughput para linha completa**

Percebe-se facilmente que o conjunto AD40M+AD40 possui o menor de todos os valores de SAT para ambas as metodologias. Isto pode ser considerado um indício de que esta estação é provavelmente o gargalo do sistema. Outro indício de um possível gargalo ocorre na estação AD20, dada a maior capacidade de produção da estação AD20M em relação a AD20.

As próximas informações obtidas referem-se ao tempo de bloqueio, tempo de espera e tempo de falha de cada estação da linha. A Figura 5.2 mostra os resultados obtidos para tempos de bloqueio, a Figura 5.3 os tempos de espera e a Figura 5.4 os tempos de falha de cada estação analisados pelos dois métodos. Estes resultados são apresentados na forma de percentual de tempo no estado considerado em relação ao tempo total de operação do sistema.

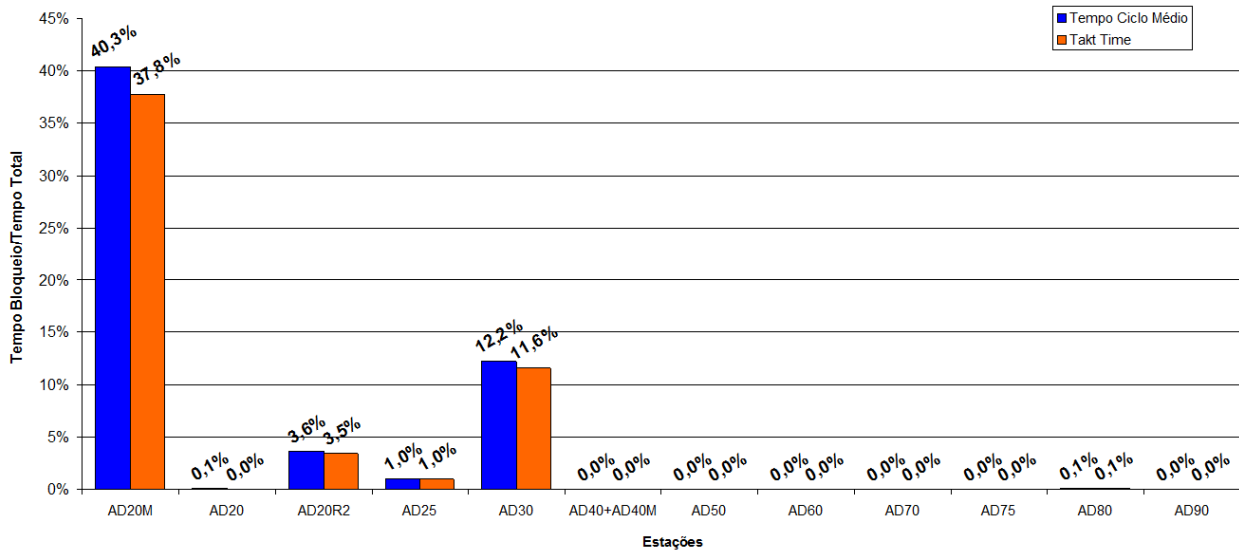


Figura 5.2 – Tempos de bloqueio de cada estação

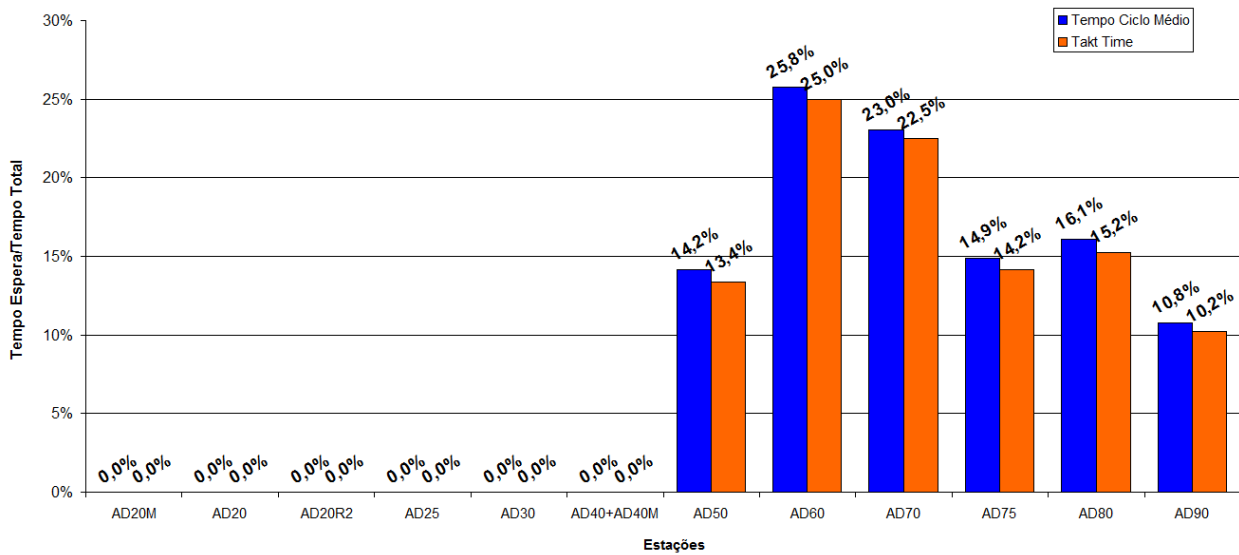


Figura 5.3 – Tempos de espera de cada estação

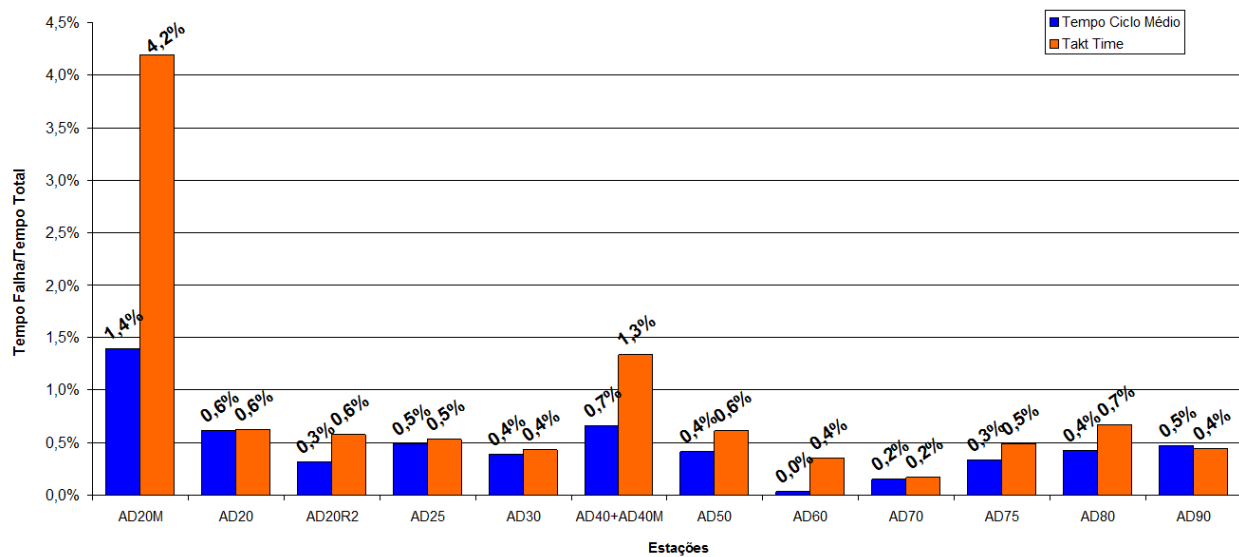


Figura 5.4 – Downtime de cada estação

Estes três gráficos devem ser analisados em conjunto para obter-se um entendimento do fluxo existente na linha de produção. Percebe-se claramente, para ambas as

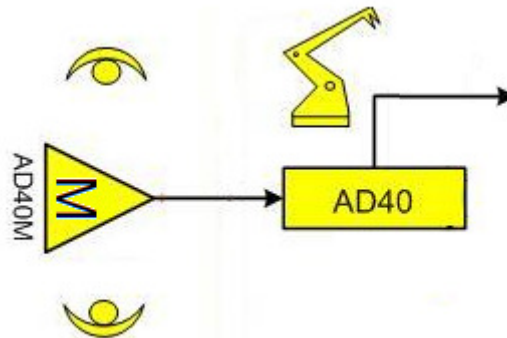
metodologias, que somente antes da estação equivalente AD40M+AD40 existem estações com tempo de bloqueio consideráveis. Também é perceptível a existência de tempos de espera somente a partir da estação equivalente AD40M+AD40. Importante chamar a atenção para o fato de que os resultados para ambos os métodos tenham obtido a mesma indicação do fluxo de produtos no sistema.

O terceiro gráfico mostra que a estação equivalente AD40M+AD40 possui o segundo maior *downtime* do sistema, ficando atrás somente da estação AD20M. Este é mais um indício de que a estação AD40M+AD40 é o gargalo do sistema. O caso da estação AD20M será debatido mais adiante.

Somando-se as evidências pode-se concluir que o gargalo do sistema encontra-se na estação equivalente AD40M+AD40. Para um maior detalhamento da posição real do gargalo é necessário uma análise dos resultados obtidos na simulação da linha de produção constituída pelas duas estações, visando determinar qual das duas é o gargalo do sistema.

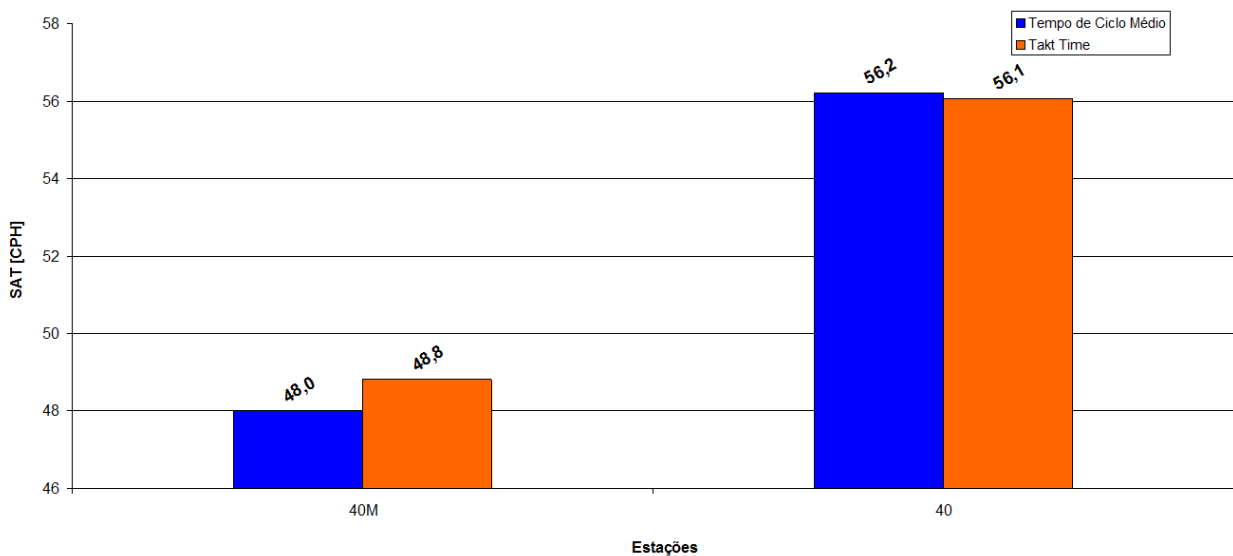
### 5.1.2 Análise da estação AD40M+AD40

O método utilizado para a análise da estação equivalente AD40M+AD40 é semelhante ao utilizado para a linha de produção completa, porém mais simplificado por se tratar apenas de duas estações de trabalho. O modelo utilizado é mostrado na Figura 5.5.



**Figura 5.5 – Modelo para estação equivalente AD40M+AD40**

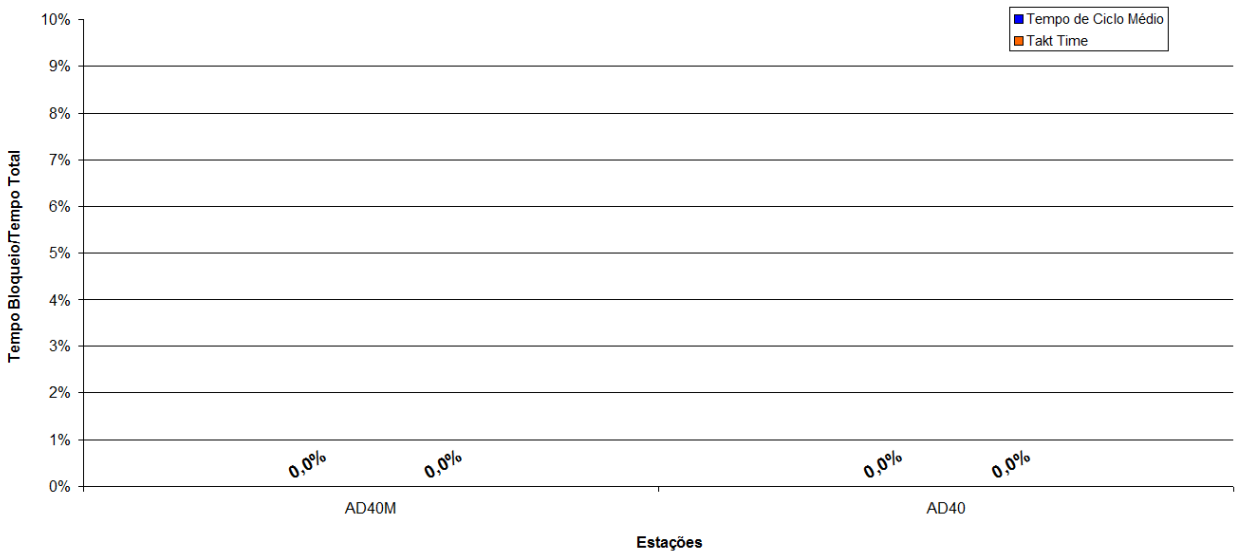
Primeiramente são obtidos os valores estimados de SAT para cada uma das estações. Os valores obtidos são mostrados na Figura 5.6.



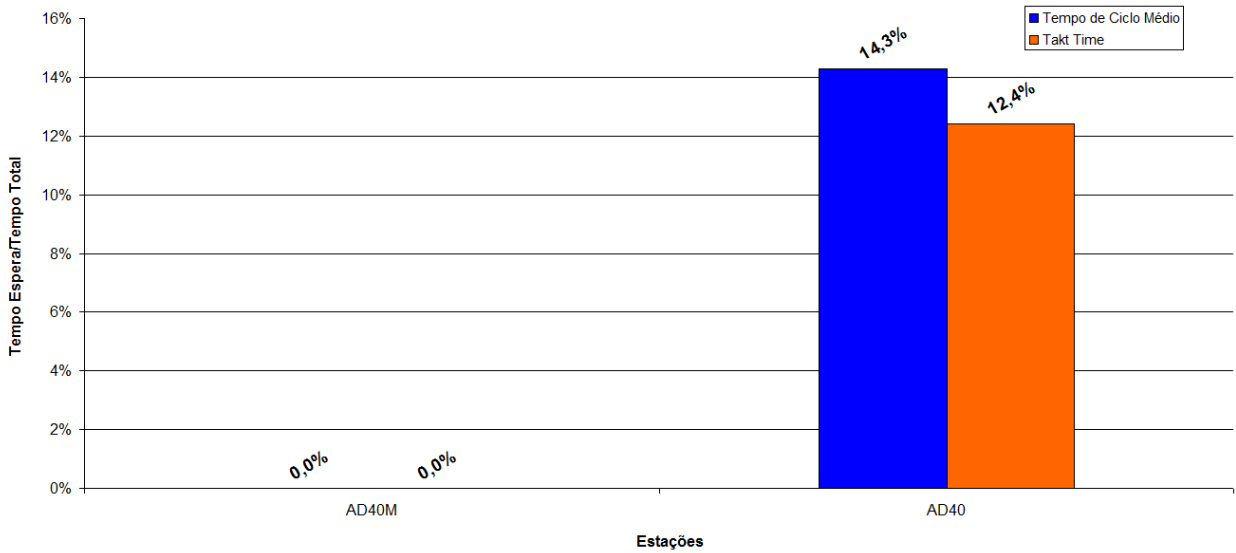
**Figura 5.6 – Stand Alone Throughput para sistema AD40M+AD40**

Em uma primeira análise pode-se perceber que possivelmente a estação 40M é o gargalo do sistema em questão. Na continuação parte-se para a análise dos tempos de

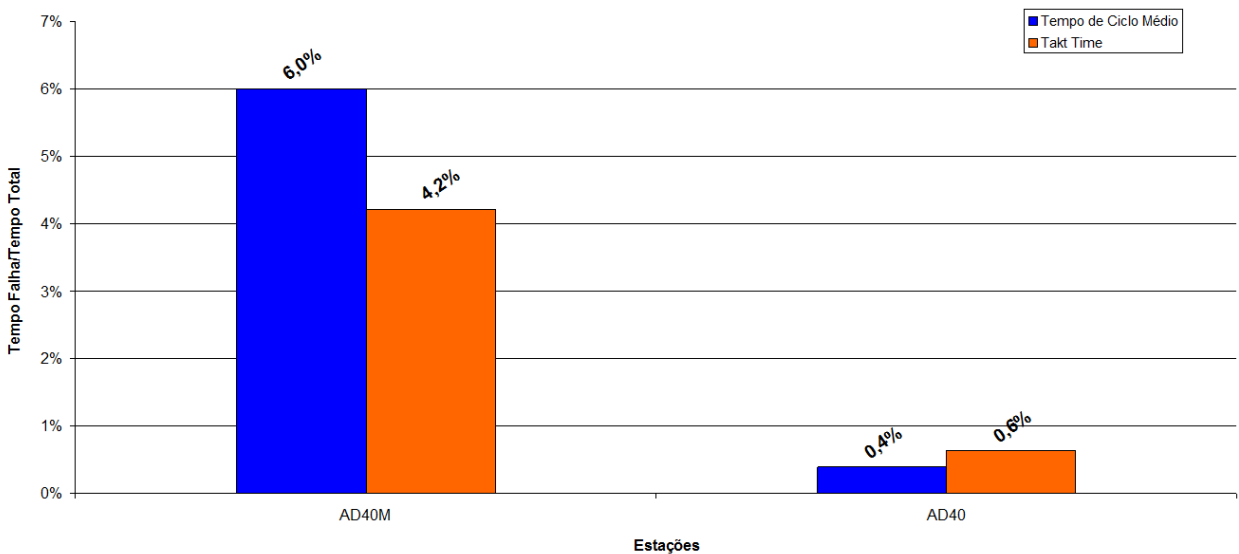
bloqueio (Figura 5.7), tempos de espera (Figura 5.8) e tempos de falha (Figura 5.9) de cada estação do sistema.



**Figura 5.7 – Tempos de bloqueio para estações do sistema**



**Figura 5.8 – Tempos de espera para estações do sistema**



**Figura 5.9 – Downtime para estações do sistema**



Analisando estes três gráficos percebe-se que em nenhum momento a estação AD40 bloqueia a estação AD40M, como se pode ver na Figura 5.7. Já a estação AD40M deixa a estação AD40 em espera, conforme se pode observar na Figura 5.8. Além disso, a estação AD40M possui um *downtime* maior que o da estação AD40, visível na Figura 5.9. Todos estes indícios juntos apontam a estação AD40M como gargalo deste sistema e, por consequência, da linha de produção completa. É importante perceber que as análises podem ser feitas para os resultados obtidos por ambas as metodologias.

### 5.1.3 Análise da estação AD20M

Uma análise importante deve ser feita a respeito da estação AD20M. Percebe-se na Figura 5.4 que a AD20M possui o maior *downtime* da linha, sendo este o dobro do valor do segundo colocado para o método do Tempo de Ciclo Médio e aproximadamente o triplo para o método do *Takt Time*. Porém, analisando o valor de tempo de ciclo médio da AD20M na Tabela 4.1, percebe-se que o mesmo é aproximadamente 80% do valor do segundo menor tempo (AD60 com 55,64 s). Também é possível perceber na Figura 5.2 que a AD20M ficou aproximadamente 40% do tempo bloqueada pela AD20, na Figura 5.3 que a AD20 em nenhum momento espera pela AD20M e na Figura 5.1 que a estimativa da capacidade de produção da AD20M é praticamente o dobro da capacidade individual das demais estações da linha. As avaliações acima são válidas para ambas as metodologias.

Estas constatações demonstram que a estação AD20M possui capacidade de produção ociosa durante grande parte do tempo, sendo o restante da linha gargalo da mesma. A utilização desta estação poderia ser otimizada aumentando-se a carga de trabalho dos operadores dela ou diminuindo-se a mão de obra aplicada na operação. Este caso demonstra claramente a necessidade da utilização de um simulador para a análise de gargalos produtivos de sistemas.

## 5.2 Resultados da análise obtidos através do CMORE

Para fins de comparação realizou-se também a simulação da linha de produção utilizando-se o simulador CMORE. A forma como são apresentados os resultados neste simulador é diferente da forma do simulador criado. O CMORE determina os gargalos ordenando de forma decrescente os potenciais de ganhos de cada uma das estações da linha simulada, ou seja, quanto maior o ganho associado a uma estação de trabalho, “mais gargalo” é a estação.

Os resultados obtidos pelo CMORE para a simulação de um modelo idêntico ao já analisado são mostrados na Tabela 5.2.

**Tabela 5.2 – Simulação realizada com o CMORE**

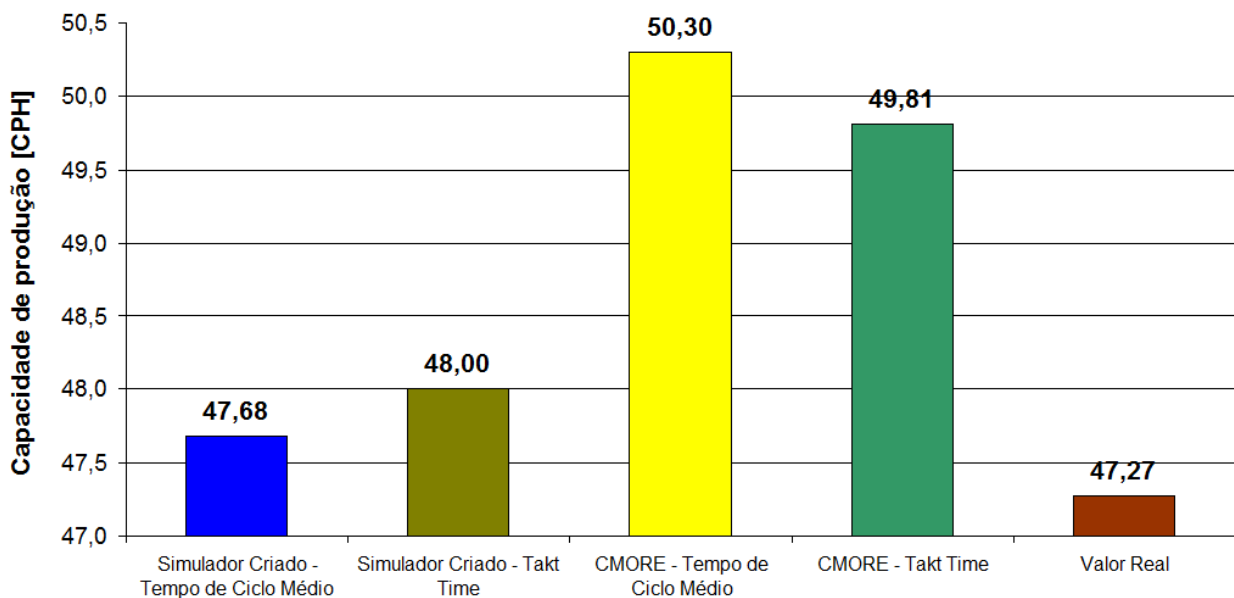
Método base Tempo de Ciclo Médio			Método base Takt Time		
Gargalo	Ganho Possível [CPH]	Capacidade Produtiva [CPH]	Gargalo	Ganho Possível [CPH]	Capacidade Produtiva [CPH]
AD40M	2,4	50,297	AD20M	1,4	49,812
AD30	1,1		AD40M	1,3	
AD25	0,5		AD30	0,9	
AD20M	0,4		AD20	0,7	
AD20	0,3		AD25	0,6	

Pode-se perceber que os resultados obtidos pela metodologia do Tempo de Ciclo Médio são compatíveis com os resultados obtidos pelo simulador criado neste trabalho, mostrando a estação AD40M como o maior gargalo do sistema, com aproximadamente duas vezes mais potencial de ganho do que a segunda.

Analisando os resultados obtidos através da metodologia do *Takt Time*, percebe-se algumas discrepâncias ao compararmos com os resultados obtidos pelo simulador criado. A estação AD20M aparece como o principal gargalo do sistema com um potencial de ganho aproximadamente igual ao potencial da estação AD40M. Este resultado examinado do ponto de vista do simulador desenvolvido neste trabalho não faz muito sentido, visto que o tempo de ciclo médio da estação AD20M é muito menor que o tempo de ciclo médio das outras estações da linha. Fica difícil determinar a causa deste resultado uma vez que a lógica do simulador é desconhecida.

### 5.3 Comparação dos valores de capacidade de produção

Uma forma de avaliar a precisão de cada um dos simuladores é comparar os valores de capacidade de produção obtidos por cada um deles com o valor real existente na linha de produção. A Figura 5.10 e a Tabela 5.3 mostram os resultados obtidos pelo simulador criado neste trabalho e o pelo CMORE para cada uma das metodologias comparadas ao dado real de produção obtido no período referente a esta análise.



**Figura 5.10 – Capacidades de produção simuladas versus valor real**

**Tabela 5.3 – Erro obtido na simulação**

	Simulador Criado - Tempo de Ciclo Médio	Simulador Criado - Takt Time	CMORE - Tempo de Ciclo Médio	CMORE - Takt Time
Capacidade Simulada [CPH]	47,682	48,000	50,297	49,812
Erro da simulação [%]	0,873%	1,545%	6,404%	5,378%
Valor Real [CPH]	47,2697			

Analisando estes valores torna-se clara a viabilidade da simulação de sistemas de manufatura através da utilização de médias, visto o baixo valor do erro envolvido nas simulações. Pode-se também, a partir destes dados, concluir que o simulador criado consegue prever com bastante precisão o fluxo dos produtos através da célula em questão.

Além disso, vale observar que a utilização da metodologia baseada no Tempo de Ciclo Médio mostrou-se mais precisa do que a metodologia baseada no *Takt Time* para o simulador criado, sendo então esta a indicada para análises futuras utilizando o mesmo. A pequena variação entre os resultados obtidos através das duas metodologias deve-se

provavelmente à proximidade entre os tempos de ciclo médio das estações de trabalho da linha e o *takt time*.

Observando a Tabela 5.4 do ponto de vista da metodologia baseada no *Takt Time* percebe-se que, excetuando-se a estação AD20M, as variações dos tempos de ciclo médios em relação ao *takt time* (66s), têm como maior diferença -10,36s na estação AD60, a qual possui o segundo maior MCEF da célula (18,70 ciclos). A segunda maior diferença pertence a AD70 que é igual a -8,04s. Esta estação possui o maior MCEF da célula (18,70 ciclos). Além disso, ambas as estações possuem um TMR semelhante as demais estações da célula.

**Tabela 5.4 – Dados de entrada para simulação - AD60 e AD70**

ESTAÇÃO	BASE TAKT TIME			BASE TEMPO DE CICLO MÉDIO		
	TCM [s]	TMR [s]	MCEF [ciclos]	TCM [s]	TMR [s]	MCEF [ciclos]
AD60	55,64	6,24	222,14	55,64	5,28	18,70
AD70	57,96	6,02	50,97	57,96	6,20	50,97

O fato é que uma estação com valores de TCM e TMR baixos e MCEF alto praticamente não afeta o fluxo na linha de produção, logo estas duas estações que possuem uma variação maior entre TCM e *takt time* pouco afetaram a capacidade de produção final da célula. Lembrando que a capacidade de produção da célula é ditada pelo gargalo.

Todas as outras estações possuem valores de TCM que variam no máximo 5s em relação ao *takt time*. Provavelmente se as estações não possuíssem um valor tão próximo ao *takt time* a diferença entre os resultados obtidos pelas duas metodologias seria maior.

As simulações realizadas pelo CMORE produziram resultados para a capacidade produtiva com um maior erro envolvido. A dificuldade de explicar este fato deve-se ao não conhecimento da lógica utilizada pelo simulador em questão. Estes resultados talvez pudessem ser melhorados se a lógica do simulador fosse conhecida, modificando-se o modelo utilizado ou a forma como os parâmetros foram utilizados, adaptando os mesmos a lógica do simulador.

## 6 CONCLUSÕES

Percebe-se que o simulador criado possui a capacidade de simular esta linha de produção de forma mais precisa que o simulador já validado. O erro encontrado entre a capacidade de produção simulada e a real (0,873%) demonstra que o simulador criado é confiável para a análise deste caso, porém a aplicação dele à outros sistemas deve ser avaliada, uma vez que somente com estes resultados não se pode validá-lo para todos os casos.

A utilização de médias para a simulação alcança resultados precisos, mostrando-se assim viável para o caso estudado. Esta forma de abordagem com certeza torna mais simples o entendimento dos resultados até mesmo pelos níveis mais baixos de uma empresa. Este fato torna a utilização de valores médios em um grande aliado para avaliação de melhorias e cabe ao engenheiro responsável por este projeto fazer uso destas vantagens a seu favor. Outro ponto importante é o fato de que a utilização do mesmo mostrou-se mais confiável quando aplicada a metodologia de determinação dos parâmetros com base no Tempo de Ciclo Médio.

## 7 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Ainda há muito a explorar sobre a metodologia desenvolvida neste trabalho. Pode-se em trabalhos futuros analisar a robustez do programa, aplicando-o a outras situações e analisando a viabilidade da utilização do mesmo em outros sistemas com configurações diferentes das encontradas neste trabalho. Visando facilitar o uso do simulador seria proveitoso criar também uma interface gráfica para a utilização do mesmo. Além disso, pode-se implementar outra forma para entrada de dados no sistema, através de distribuições

estatísticas com fim de verificar se o comportamento da lógica central do simulador se aplica a esta forma de dados de entrada.

Um estudo a ser desenvolvido futuramente, no caso de não necessidade de aumento da capacidade produtiva, é aplicar o simulador para obter a sincronia da linha de produção visando a adequação das outras estações ao ritmo imposto pelo gargalo. Aplicando a simulação o engenheiro pode reduzir os esforços em estações não-gargalo visando obter uma redução da carga da estação de trabalho, redução do inventário em processo, maior período de vida útil dos equipamentos e menor custo de manutenção dos mesmos. O simulador criado pode ser utilizado com estes fins, analisando-se os valores de tempos de espera, bloqueio e falhas simulados para cada estação. Para otimizar o sistema o engenheiro deve dispor de todos os conhecimentos adquiridos na sua formação para alcançar estes resultados, servindo a determinação do gargalo como foco para o desenvolvimento facilitado de seu trabalho.

## 8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CASSIDY, M. Throughput Improvement Initiatives in an Automotive Assembly Plant Body Shop. MA, USA: MIT, 1999. 77 p. Dissertação (Mestrado) – Master of Science in Mechanical Engineering and Master of Business Administration, Department of Mechanical Engineering and Sloan School of Management, MA, USA: Massachusetts Institute of Technology, 1999.

GOLDRATT, E.M. *Essays on the Theory of constraints*. Great Barrington, MA, USA: North River Press, 1998.

GOLDRATT, E.M.; FOX, R.E. *A Corrida Pela Vantagem Competitiva*. Tradução do inglês. 2. ed.. São Paulo: Instituto de Movimentação e Armazenagem de Materiais, 1991.

GROOVER, M.P. *Automation, Production Systems, and Computer Integrated Manufacturing*. Rio de Janeiro: Prentice-Hall do Brasil, Ltda., 1987

LAW, A.M. e KELTON, W.D. *Simulation modeling and analysis*. 2. ed.. McGraw-Hill Inc., 1991

LONGCORE, J.R.M. Bottleneck Identification in Cycle Time Reduction and Throughput improvement efforts in an automotive transmission plant. MA, USA: MIT, 1999. 71 p. Dissertação (Mestrado) – Master of Science in Mechanical Engineering and Master of Science in Management Department of Mechanical Engineering and Sloan School of Management, MA, USA: Massachusetts Institute of Technology, 1999.

MOREIRA, R. Programa Integrar – CNM/CUT – Caderno do aluno - Trabalho e tecnologia, São Paulo: 1998.p. 116 -130

PINTO, J.P. *Glossário de Termos e Acrónimos Lean Thinking*. Vila Nova de Famalicão, Portugal: 2008. 9 p. Disponível em:  
<[http://www.leanthinkingcommunity.org/recursos\\_lean.html](http://www.leanthinkingcommunity.org/recursos_lean.html)> Acesso em 16 nov. 2009.

RUBIO, A. L. *O Planejamento e a Programação da Produção: Entendendo os conceitos e técnicas utilizados nos diversos ambientes de produção*. São Paulo: Editora STS, 2002.

TOLEDO JUNIOR, Y.B. *Cronoanálise*. 16. ed.. Mogi das Cruzes: O&M Itys Fides, 2007.

## APÊNDICES

### 8.1 Código fonte do simulador

/\*Código desenvolvido com a finalidade de analisar o fluxo de materiais em uma linha de produção\*/  
/\*

Desenvolvido por:  
Neimar Rodrigues de Freitas  
Email: neimar@gmail.com

Programa é parte do Trabalho de Diplomação do curso de Engenharia Mecânica da UFRGS:  
DESENVOLVIMENTO DE METODOLOGIA COMPUTACIONAL PARA DETERMINAÇÃO DE GARGALOS  
PRODUTIVOS – ANÁLISE DE CASO

**Este código pode ser utilizado livremente desde que seja feita a referência a este trabalho e o autor seja notificado de seu uso através do email: neimar@gmail.com**

OBS: Antes de o programa ser compilado deve-se modificar a variável MAX substituindo-se a letra N pelo número de estações existentes na linha de produção.

O programa, ao ser utilizado neste trabalho, foi executado no OS Ubuntu 9.04 e compilado através do GCC Compiler

\*/

```
#define txt 15
//////////////////////////////////////////////////////////////////
#define MAX N // VARIÁVEL A SER MODIFICADA ///
//////////////////////////////////////////////////////////////////
#include <stdio.h>
#include <string.h>
#include <math.h>
#include <stdlib.h>

float blocoa (float t, float c, float s, float cf)
{
if(c>=cf)
{
return 2;
}
if(t>=s)
{
return 0;
}
else
{
return 1;
}
}

int main()
{
float s[MAX+2];
float cf[MAX+2];
float tr[MAX+2];
float tf[MAX+2];
float deltat=0;
int total=0;
int ciclosin=0;
int ciclosout=0;
float jphin=0;
float jphout=0;
float st[MAX+2];
float bl[MAX+2];
float dt[MAX+2];
float sat[MAX+2];
```

```

float stp[MAX+2];
float blp[MAX+2];
float dtp[MAX+2];
float cronos=0;
float cycle=0;
float t[MAX+2];
float c[MAX+2];
int e[MAX+2];
int status[MAX+2];
int full[MAX+2];
int i,j,k,l;
char in[txt], wait;
char out[txt];
float time;
int caso;
int bolha;

FILE *p;
printf("\n\nDigite o nome do arquivo de origem dos dados: ");
gets(in);
if ((p = fopen(in, "r")) == NULL)
{
printf("\nErro ao abrir o arquivo %s!\n",in);
return(0);
}
printf("\n\nDados do arquivo: %s\n", in);
i=1;
while (!feof(p))
{
fscanf(p,"%f",&s[i+1]);
fscanf(p,"%f",&cf[i+1]);
fscanf(p,"%f",&tr[i+1]);
printf("\nSpeed(s):%f \nMCBF(ciclos):%f \nMTTR(segundos):%f \n",s[i+1],cf[i+1],tr[i+1]);
i=i+1;
}
s[1]=0.00000001;
s[MAX+2]=0.00000001;
cf[1]=999999999;
cf[MAX+2]=999999999;
tf[1]=0;
tf[MAX+2]=0;

printf("\n\nDigite o passo de tempo a ser utilizado: ");
scanf("%f",&deltat);
printf("\n\nDigite o tempo total de simulacao a ser realizado (em segundos): ");
scanf("%d",&total);
printf("\ndelta t = %f \ntempo total da simulacao = %d \n", deltat,total);
for (i=1;i<MAX+3;i=i+1)
{
t[i]=0;
c[i]=0;
e[i]=1;
status[i]=1;
st[i]=0;
bl[i]=0;
dt[i]=0;
full[i]=1;
}
for (i=2;i<MAX+2;i=i+1)
{
tf[i]=tr[i]+s[i];
}
printf("\n\nAnalise do Stand Alone Throughput - SAT\n");
for (i=2;i<MAX+2;i=i+1)
{
sat[i]=3600/(s[i]+(tr[i]/cf[i]));
printf("\nsat(%d) = %f [jph]", i, sat[i]);
}
printf("\n\n");
e[1]=0;

```

```

e[MAX+2]=0;
full[1]=1;
full[MAX+2]=0;

for (i=2;i<MAX+2;i=i+1)
{
e[i]=blocoa(t[i],c[i], s[i], cf[i]);
}
for (time=(deltat);(time<total);time=time+deltat)
{
for (j=MAX+1;j>1;j=j-1)
{
if(e[j]==0)
{
if(full[j]==1)
{
if(e[j+1]==0)
{
if(full[j+1]==0)
{
full[j]=full[j]-1;
full[j+1]=full[j+1]+1;
if(e[j-1]==0)
{
if(full[j-1]==1)
{
full[j-1]=full[j-1]-1;
full[j]=full[j]+1;
status[j]=1;
}
else
{
status[j]=5;
}
}
else
{
status[j]=3;
}
}
else
{
status[j]=5;
}
}
else
{
status[j]=4;
}
}
else
{
if(e[j-1]==0)
{
if(full[j-1]==1)
{
full[j-1]=full[j-1]-1;
full[j]=full[j]+1;
status[j]=1;
}
else
{
status[j]=5;
}
}
else
{
status[j]=3;
}
}
}
}
}
}

```

```

}
else
{
if(e[j]==2)
{
status[j]=2;
}
else
{
status[j]=1;
}
}
}
for (i=2;i<MAX+2;i=i+1)
{
caso=status[i];
switch (caso)
{
case 1:
{
t[i]=t[i]+deltat;
c[i]=c[i]+(deltat/s[i]);
e[i]=blocoa(t[i], c[i], s[i], cf[i]);
break;
}
case 2:
{
if(t[i]>=s[i])
{
dt[i]=dt[i]+deltat;
t[i]=t[i]+deltat;
}
else
{
t[i]=t[i]+deltat;
}
if(t[i]>=tf[i])
{
e[i]=0;
c[i]=0;
}
else
{
e[i]=2;
}
break;
}
case 3:
{
st[i]=st[i]+deltat;
break;
}
case 4:
{
bl[i]=bl[i]+deltat;
break;
}
case 5:
{
break;
}
default:
{
printf("ALERTA: Caso nao previsto pelo programa!");
break;
}
}
}
ciclosin=ciclosin-(full[1]-1);
ciclosout=ciclosout+full[MAX+2];

```



```

full[1]=1;
if(full[MAX+2]==1)
{
cycle = time-cronos;
printf("%10.2f\n",cycle);
cronos=time;
}
full[MAX+2]=0;
for (j=2;j<MAX+2;j=j+1)
{
if(e[j]==0)
{
t[j]=0;
}
}
jphin=(3600*ciclosin)/time;
jphout=(3600*ciclosout)/time;
for (i=2;i<MAX+2;i=i+1)
{
stp[i]=(st[i]/time);
blp[i]=(bl[i]/time);
dtp[i]=(dt[i]/time);
printf("\nst(%d): %f \t bl(%d): %f \t dt(%d): %f", i,st[i],i,bl[i],i,dt[i]);
printf("\nstp(%d): %f \t blp(%d): %f \t dtp(%d): %f\n\n", i,stp[i],i,blp[i],i,dtp[i]);
}
printf("\n\nCiclos na entrada do sistema = %d \nCiclos na saida do sistema = %d",ciclosin, ciclosout);
printf("\n\nJPH na entrada do sistema = %f \nJPH na saida do sistema = %f\n\n",jphin, jphout);
return(0);
}

```

## 8.2 Arquivo de entrada de dados para o simulador - análise linha completa

34.920  
30.484  
32.263  
65.825  
14.240  
6.916  
62.687  
22.675  
5.517  
65.347  
14.594  
5.296  
65.735  
16.413  
5.033  
75.000  
0.373  
0.413  
64.272  
18.409  
5.963  
55.640  
222.143  
6.238  
57.959  
50.967  
6.022  
63.908  
23.428  
5.795  
62.600  
21.303  
7.025  
66.537  
13.380  
5.419

### 8.3 Saída resumida gerada pelo simulador - análise da linha completa

Digite o nome do arquivo de origem dos dados:

Dados do arquivo: yesmanual

Speed(s):34.919998  
MCBF(ciclos):30.483999  
MTTR(segundos):32.263000

Speed(s):65.824997  
MCBF(ciclos):14.240000  
MTTR(segundos):6.916000

Speed(s):62.687000  
MCBF(ciclos):22.674999  
MTTR(segundos):5.517000

Speed(s):65.347000  
MCBF(ciclos):14.594000  
MTTR(segundos):5.296000

Speed(s):65.735001  
MCBF(ciclos):16.413000  
MTTR(segundos):5.033000

Speed(s):75.000000  
MCBF(ciclos):0.373000  
MTTR(segundos):0.413000

Speed(s):64.272003  
MCBF(ciclos):18.409000  
MTTR(segundos):5.963000

Speed(s):55.639999  
MCBF(ciclos):222.143005  
MTTR(segundos):6.238000

Speed(s):57.959000  
MCBF(ciclos):50.966999  
MTTR(segundos):6.022000

Speed(s):63.908001  
MCBF(ciclos):23.427999  
MTTR(segundos):5.795000

Speed(s):62.599998  
MCBF(ciclos):21.302999  
MTTR(segundos):7.025000

Speed(s):66.537003  
MCBF(ciclos):13.380000  
MTTR(segundos):5.419000

Speed(s):0.000000  
 MCBF(ciclos):-0.000030  
 MTTR(segundos):-0.000030

Digite o passo de tempo a ser utilizado:

Digite o tempo total de simulacao a ser realizado (em segundos):  
 delta t = 0.500000  
 tempo total da simulacao = 7776000

Analise do Stand Alone Throughput - SAT

sat(2) = 100.060158 [jph]  
 sat(3) = 54.289906 [jph]  
 sat(4) = 57.206139 [jph]  
 sat(5) = 54.786274 [jph]  
 sat(6) = 54.511055 [jph]  
 sat(7) = 47.301678 [jph]  
 sat(8) = 55.731071 [jph]  
 sat(9) = 64.669014 [jph]  
 sat(10) = 61.986507 [jph]  
 sat(11) = 56.113789 [jph]  
 sat(12) = 57.206635 [jph]  
 sat(13) = 53.777889 [jph]

67.50  
 67.00  
 67.00  
 67.00  
 67.00  
 67.00  
 67.00  
 67.00  
 67.00  
 67.00  
 71.50  
 75.50  
 75.50  
 75.50  
 80.50  
 70.50

...

Neste intervalo do arquivo de saída original são mostrados os tempos de ciclo de saída da célula para cada produto.

...

69.50  
 75.50  
 75.50  
 81.50  
 69.50  
 75.50  
 75.50  
 75.50

st(2): 0.000000 stp(2): 0.000000	bl(2): 3137531.500000 blp(2): 0.403489	dt(2): 107965.000000 dtp(2): 0.013884
st(3): 0.000000 stp(3): 0.000000	bl(3): 10447.500000 blp(3): 0.001344	dt(3): 48062.000000 dtp(3): 0.006181
st(4): 0.000000 stp(4): 0.000000	bl(4): 283159.000000 blp(4): 0.036414	dt(4): 24623.500000 dtp(4): 0.003167
st(5): 0.000000 stp(5): 0.000000	bl(5): 76338.500000 blp(5): 0.009817	dt(5): 37763.000000 dtp(5): 0.004856
st(6): 0.000000 stp(6): 0.000000	bl(6): 948143.500000 blp(6): 0.121932	dt(6): 30290.000000 dtp(6): 0.003895
st(7): 0.000000 stp(7): 0.000000	bl(7): 0.000000 blp(7): 0.000000	dt(7): 51496.500000 dtp(7): 0.006622
st(8): 1100400.500000 stp(8): 0.141512	bl(8): 0.000000 blp(8): 0.000000	dt(8): 32520.000000 dtp(8): 0.004182
st(9): 2005529.500000 stp(9): 0.257913	bl(9): 4.000000 blp(9): 0.000001	dt(9): 2796.000000 dtp(9): 0.000360
st(10): 1790010.500000 stp(10): 0.230197	bl(10): 208.000000 blp(10): 0.000027	dt(10): 12114.000000 dtp(10): 0.001558
st(11): 1158430.000000 stp(11): 0.148975	bl(11): 189.000000 blp(11): 0.000024	dt(11): 25746.000000 dtp(11): 0.003311
st(12): 1249841.000000 stp(12): 0.160731	bl(12): 4757.500000 blp(12): 0.000612	dt(12): 32767.000000 dtp(12): 0.004214
st(13): 838597.000000 stp(13): 0.107844	bl(13): 0.000000 blp(13): 0.000000	dt(13): 36780.000000 dtp(13): 0.004730

Ciclos na entrada do sistema = 102993  
Ciclos na saída do sistema = 102994

JPH na entrada do sistema = 47.681946  
JPH na saída do sistema = 47.682407