



## SIMULAÇÃO DE UMA LINHA DE MONTAGEM DE MOTORES

**Miguel Cezar Santoro**

Universidade de São Paulo – Escola Politécnica  
Departamento de Engenharia de Produção  
Área de Gestão de Operações e Logística  
E-mail: santoro@usp.br

**Luiz Henrique Moraes**

Ford Motor Co. do Brasil  
Operações de Força-Motriz de Taubaté  
Desenvolvimento de Produto e Engenharia de Manufatura  
E-mail: lmoraes@ford.com

### *Resumo*

---

*A Simulação tem-se mostrado bastante eficaz na solução de problemas complexos, tais como aqueles envolvidos no projeto de sistemas de produção orientados a produtos – linhas de montagem e fabricação. Neste trabalho, apresenta-se um exemplo de aplicação nesse contexto, no qual a Simulação foi empregada na avaliação do projeto de uma nova linha de montagem de motores na Ford do Brasil.*

***Palavras-chave: balanceamento de linha, linha de montagem de motores, planejamento de capacidade, simulação de sistemas de produção, sistemas de produção orientados a produtos.***

### **1. Introdução**

**E**m sistemas de produção orientados a produtos, o problema de programação e de sua flexibilidade deve ser resolvido durante o projeto, pois nessa etapa são estabelecidos o tempo de ciclo, o balanceamento e a seqüência de operações (BUFFA & MILLER, 1979). Por

outro lado, o projeto do sistema de produção está diretamente relacionado ao planejamento de capacidade, pois o último depende de decisões a respeito de dimensionamento de recursos, localização, arranjo físico, etc. (BUFFA, 1983). Dessa forma, o projeto de sistemas orientados a produtos, bem como os modelos associados a essa atividade, podem ser inseridos no escopo

tanto do Planejamento, Programação e Controle de Produção como do Planejamento de Capacidade. Neste artigo apresenta-se uma aplicação real abordando o emprego de modelos de simulação para avaliação do projeto de uma nova linha de montagem de motores.

De acordo com ASKIN & STANDRIDGE (1993), “uma linha de montagem é um conjunto de estações de trabalho dispostas seqüencialmente, normalmente interligadas mediante um sistema contínuo de movimentação de materiais, e projetada para montar componentes e realizar qualquer operação necessária à obtenção de um produto acabado”. Dessa forma, o problema básico de balanceamento de linha consiste em atribuir os elementos de trabalho a um número mínimo de estações, considerando-se um tempo de ciclo predeterminado. Isso equivale a minimizar os custos de montagem, pois se está reduzindo o tempo ocioso de mão-de-obra e o investimento necessário. Para tal, podem ser empregados modelos de balanceamento heurísticos, embora tais modelos dificilmente incorporem todas as particularidades relevantes de um processo de montagem, tais como operações em paralelo, particularidades de transportadores e sistemas de movimentação, interação entre recursos, etc. Assim, a Simulação pode ser empregada para validar o projeto de uma linha de montagem, permitindo considerar detalhes que dificilmente o seriam em um modelo de balanceamento. Esse será o trabalho descrito neste artigo.

## 2. Simulação de Sistemas de Produção

Simulação de Sistemas consiste no “processo de se construir um modelo lógico-matemático de um sistema real e de experimentá-lo, normalmente com auxílio de um computador”, o que permite obter conclusões sobre sistemas sem construí-los, se forem novos, e sem perturbá-los, se existentes (PRITSKER, 1986). No âmbito da produção, a Simulação é aplicada no projeto e análise de sistemas de movimentação de materiais, de linhas de fabricação e

montagem, de sistemas de armazenagem automatizados, etc. Nesses casos, a Simulação permite avaliar sistemas de produção complexos pela análise da interação entre seus componentes. Particularmente em sistemas de produção automatizados, a Simulação concentra-se em avaliar como a interação entre recursos (máquinas, equipamentos e pessoal) afeta o desempenho global do sistema (PEGDEN *et al.*, 1995). Esse é o caso da maioria das linhas de montagem atuais, inclusive do sistema que constitui o objeto de estudo deste trabalho.

Para LAW & KELTON (1991), o benefício geral de se aplicar a Simulação à produção é que ela permite ao engenheiro ou gerente obter uma visão sistêmica do efeito que alterações locais terão sobre o desempenho global do sistema de produção. “Se uma mudança ocorre numa estação em particular, o impacto em seu desempenho é previsível. Por outro lado, pode ser difícil, senão impossível, determinar antecipadamente o impacto dessa mudança no desempenho do sistema”. Além disso, diversos benefícios particulares decorrem da aplicação da Simulação ao projeto e avaliação de sistemas de produção, tais como maior utilização de recursos necessários, redução de estoque em processo, maior velocidade e confiabilidade de entrega, menor necessidade de capital, menores custos operacionais, maior compreensão do sistema em razão da coleta de dados requerida pela Simulação e melhor reflexão sobre determinados aspectos do sistema de produção graças à construção do modelo. LAW & KELTON (1991) também identificam três categorias gerais de problemas em produção que podem ser solucionados com auxílio da Simulação:

- a) *dimensionamento de recursos físicos e mão-de-obra*, considerando sistemas de movimentação de materiais, “pulmões” de estoque e *mix* de produção.
- b) *avaliação do sistema*: determinação da capacidade de produção e do tempo de fluxo e identificação de gargalos.
- c) *avaliação de decisões operacionais*: níveis de estoque, programas de produção, níveis de

controle de sistemas automatizados, confiabilidade de atividades de manutenção e de controle de qualidade.

Qualquer que seja o problema a ser atacado, é de grande importância a determinação de medidas de desempenho adequadas. Assim, os autores destacam diversos critérios de desempenho:

1. *capacidade de produção*: consiste na quantidade de produção por período e, normalmente, se deseja avaliar um sistema quanto ao atendimento ou não de uma solicitação prévia de capacidade.
2. *tempo de fluxo*: compreende o intervalo de tempo transcorrido desde a chegada de um lote no sistema até seu processamento completar-se, ou até o lote ser liberado para expedição.
3. *inventário em processo*: consiste em lotes e peças em filas, aguardando transporte ou em movimentação, sendo diretamente proporcional às duas medidas anteriores.
4. *pontualidade de entrega*: baseia-se na habilidade apresentada pelo sistema em atender a prazos e condições predeterminadas para completar o processamento de lotes.
5. *utilização de recursos*: permite estabelecer a necessidade de recursos adicionais.
6. *situação de recursos*: complementa a medida anterior, podendo cada máquina ou equipamento apresentar-se em falha (*failed*), aguardando (*starved*, devido à falha em estação anterior), bloqueada (*blocked*, devido à falha em estação posterior, no caso de sistemas contínuos com restrição de acúmulo de lotes ou peças) ou, ainda, assumindo outras condições de acordo com os objetivos e características particulares do sistema.

Qualquer que seja o problema a ser atacado, é de grande importância a determinação de medidas de desempenho adequadas, e a escolha de tais medidas dependerá dos objetivos específicos do estudo. No que se apresenta a seguir, o objetivo principal corresponde à segunda categoria mencionada anteriormente –

*avaliação do sistema* –, e foram empregadas duas medidas de desempenho: *capacidade de produção* e *tempo de fluxo*.

### 3. Apresentação do Sistema e do Estudo

O sistema estudado integra a fábrica de motores da Ford do Brasil, localizada em Taubaté (*Taubate Engine Plant*), no interior do Estado de São Paulo. No Conjunto Industrial de Taubaté concentra-se a produção de motores, transmissões e componentes de chassis da divisão sul-americana da *Ford Motor Co.*, atualmente a segunda maior fabricante de automóveis do mundo. O estudo de Simulação que será apresentado foi realizado em 1996 e incluiu a montagem do motor *Endura*, empregado nos modelos *Fiesta*, *Ka* e *Courier*. Além deste motor, a fábrica produz transmissões e diversos componentes de chassis para todos os modelos de automóveis da Ford sul-americana (veículos mencionados e *Escort*) e diversos componentes de chassis para caminhonetes e caminhões médios e pesados.

A aplicação da Simulação foi uma iniciativa da Engenharia de Produto e Manufatura Central de Força-Motriz da Divisão Sul-americana da Ford, responsável pela implementação de todos os programas de motores e transmissões no Brasil. Isso ocorreu numa época em que a Ford estava introduzindo uma nova linha de produtos no país (inicialmente o *Fiesta* e o novo *Escort*), e a nova linha de montagem de motores foi escolhida para ser objeto de estudo. Para o desenvolvimento dos modelos, foi selecionado o *software ARENA*, por recomendação de especialistas em Simulação da divisão norte-americana da empresa e pela disponibilidade de suporte local para treinamento e assessoria.

A Simulação foi inicialmente planejada para avaliação de capacidade e outros índices de desempenho da linha de montagem e, desde o início, foi decidido aplicar a Simulação a linhas de usinagem que fossem implementadas posteriormente. Entretanto, neste artigo, será apenas apresentado o estudo relacionado à linha

de montagem de motores, tendo esse estudo os seguintes objetivos:

- a) *avaliação* da linha de montagem (objetivo principal do estudo), considerando parâmetros relacionados à variabilidade de operações manuais e disponibilidade e manutenibilidade de máquinas e equipamentos;
- b) *otimização* do número de paletes;
- c) *análise* da interação homem-máquina nas células de teste a quente.

Dado o segundo objetivo – otimização –, o número de paletes necessário foi considerado *variável de decisão*. Por outro lado, foram utilizadas duas *medidas de desempenho*:

- a) *capacidade de produção*: representada pelo volume de produção por período de tempo. Esse foi o principal critério de decisão, e sua importância deve-se à sua correlação direta com o custo do produto e, conseqüentemente, com a própria rentabilidade do sistema.
- b) *tempo de fluxo*: constituiu o critério secundário de decisão. A escolha dessa medida de desempenho se deve à importância que a velocidade de produção e a precisão de programação assumem para o sistema em estudo.

Por uma questão de confidencialidade, será apenas apresentada uma descrição conceitual do processo de fabricação e dos dados utilizados nos modelos. Por outro lado, a apresentação de resultados se concentrará mais nos benefícios qualitativos que em resultados numéricos obtidos.

Finalmente, é importante esclarecer que a documentação foi compilada durante todas as etapas do estudo, incluindo fluxogramas de processo, tempos elementares estimados, desenhos de arranjo físico, parâmetros de manutenção (tempo médio entre paradas e tempo médio de reparo), esquemas dos modelos de simulação construídos e planilhas com resultados obtidos. Entretanto, tal documentação não será apresentada, pois compreende informações confidenciais da empresa onde o projeto foi realizado.

Resumindo, o objetivo geral do estudo consiste em avaliar a capacidade da linha de montagem, considerando parâmetros de manutenção e outros dados relevantes do processo e visando ao dimensionamento de um número ótimo de paletes. Além disso, pretende-se avaliar a interface homem-máquina na área de teste a quente, conforme será explicado em detalhes. Dessa maneira, o restante deste artigo consiste de quatro itens – além de dois outros dedicados a considerações finais e conclusão. No primeiro é descrito o sistema a ser estudado, o que inclui informações relacionadas às etapas de construção do modelo e aquisição de dados. O segundo, implementação do modelo, corresponde às etapas de tradução do modelo, verificação e validação. No terceiro item apresentam-se os resultados e conclusões do estudo. Finalmente, o último item inclui detalhes relacionados à área de teste a quente, que foi objeto de um estudo independente.

#### 4. Descrição do Sistema

A linha de montagem de motores compõe-se de várias dezenas de estações de trabalho manuais e automáticas, interligadas por um transportador acumulativo. Os motores são montados sobre paletes, sendo que o processo de montagem se inicia com a colocação do bloco de cilindros, previamente lavado, sobre um palete vazio. A partir disso, diversos componentes são montados em cada estação de trabalho: conjunto de pistões, casquilhos, virabrequim, cabeçote, bomba de óleo, cárter, bomba de água, etc. Em duas posições da linha o motor é testado e, em caso de falha, é desviado para que possa ser retrabalhado. Ao final do processo, existe uma área de teste a quente (*hot test*), descrita em detalhes no item 7, e também um desvio para reparo de motores defeituosos. No final da linha de montagem o motor completo é retirado do palete e depositado em um contenedor, e o palete retorna para a primeira estação – após passar por uma lavadora –, onde um novo bloco será montado.

**Tabela 1 – Subsistemas da linha de montagem.**

SUBSISTEMA	LIMITES
Linha principal (primeiro segmento).	Da lavadora de paletes até a primeira travessia do corredor.
Linha principal (segundo segmento).	Da primeira travessia do corredor até o acesso às células de teste a quente.
Área de teste a quente ( <i>hot test</i> ).	Do acesso às células de teste até a saída de motores.
Lavadora de blocos.	Do abastecimento de peças até a operação de montagem do bloco.
Lavadora de virabrequins.	Do abastecimento de peças até a operação de montagem do virabrequim.
Submontagem de pistões.	Do abastecimento de peças até a operação de montagem do conjunto pistão e biela.
Lavadora e submontagem de cabeçotes.	Do abastecimento de peças até a operação de montagem do cabeçote.

Além do processo seqüencial de montagem, descrito acima, existem diversos subsistemas paralelos: duas lavadoras (para blocos e virabrequins), uma linha de submontagem de conjunto pistão-biela e uma linha de submontagem de conjunto do cabeçote, esta incluindo também uma terceira lavadora. As operações de limpeza, proporcionadas pelas três lavadoras mencionadas, devem-se ao fato de as peças serem produzidas na divisão européia da Ford. Existe ainda uma quarta lavadora, destinada à limpeza de paletes no início do processo de montagem. As Figuras 1, 2 e 3 fornecem, respectivamente, uma representação geral do sistema, uma representação detalhada de um segmento da linha e uma representação detalhada da área de teste a quente.

É importante mencionar que a descrição acima não pretende ser exaustiva ou detalhada, mas apenas fornecer uma visão geral e conceitual da linha de montagem. Uma descrição detalhada do projeto da linha, bem como de todos os dados utilizados, passaria a conter informações confidenciais da empresa onde o estudo foi realizado, dificultando a publicação do artigo sem acrescentar conteúdo relevante.

Finalmente, visando facilitar a formulação e tradução do modelo, a linha de montagem foi decomposta em diversos subsistemas, de acordo com a Tabela 1.

Na linha principal, as operações de montagem são realizadas sobre transportadores acumulativos de paletes (cada palete permanece estacionado até que o operador termine seu ciclo de operação). A linha também possui transportadores acumulativos (entrada e saída das lavadoras), transportadores por gravidade (submontagem de pistões) e transportadores acumulativos com retorno de paletes (submontagem do cabeçote). O processo da área de teste a quente é descrito em detalhes no item 7. Outras características da linha de montagem são:

- a) veículos especiais (*shuttles*): permitem a travessia do corredor em dois pontos da linha de montagem;
- b) áreas de reparo: motores reprovados em estações de inspeção na linha principal ou na área de teste a quente são desviados para bancadas de reparo.

Todas as situações acima foram facilmente representadas pelo *software ARENA*, inclusive alguns detalhes não mencionados e interessantes

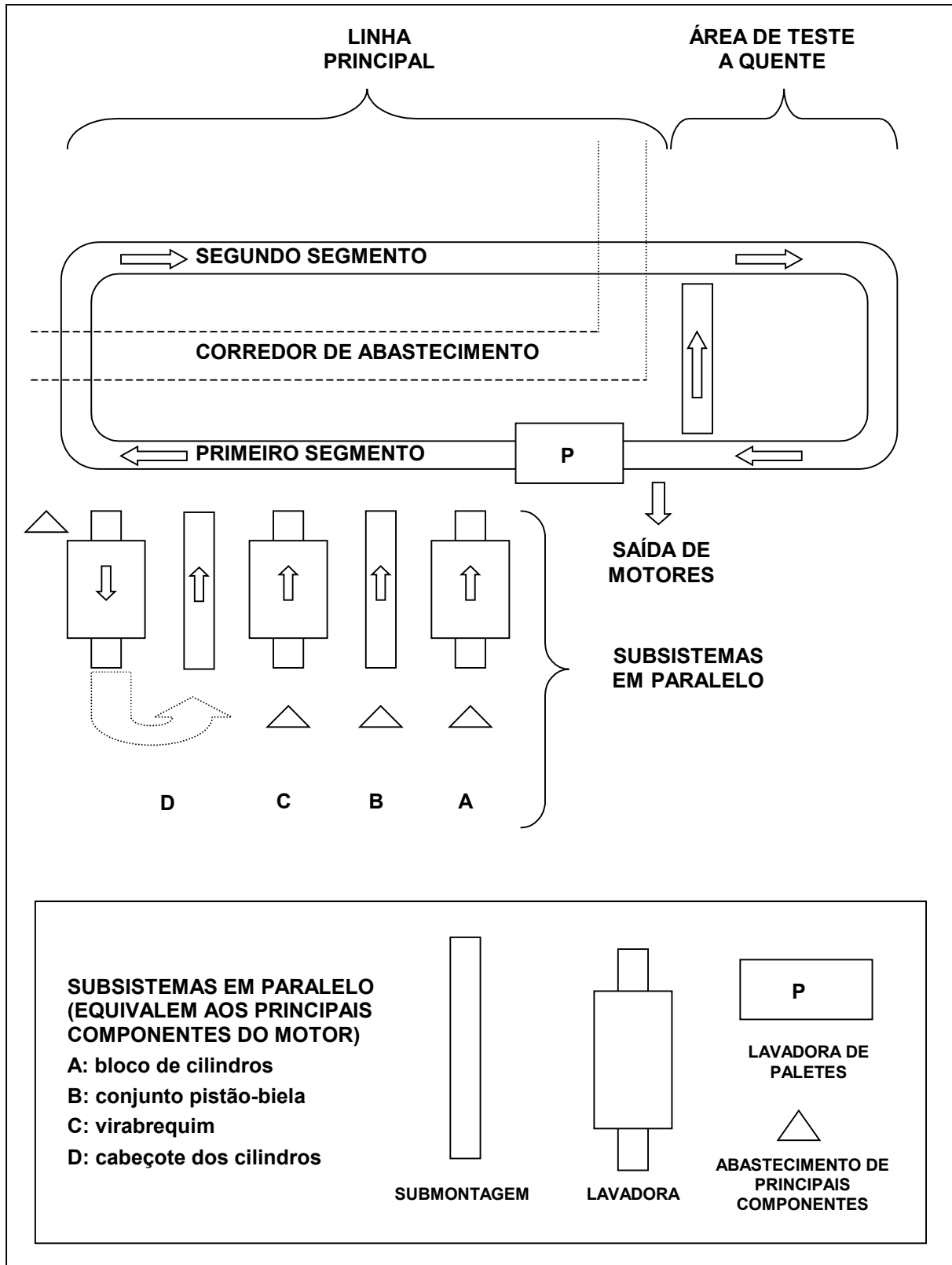
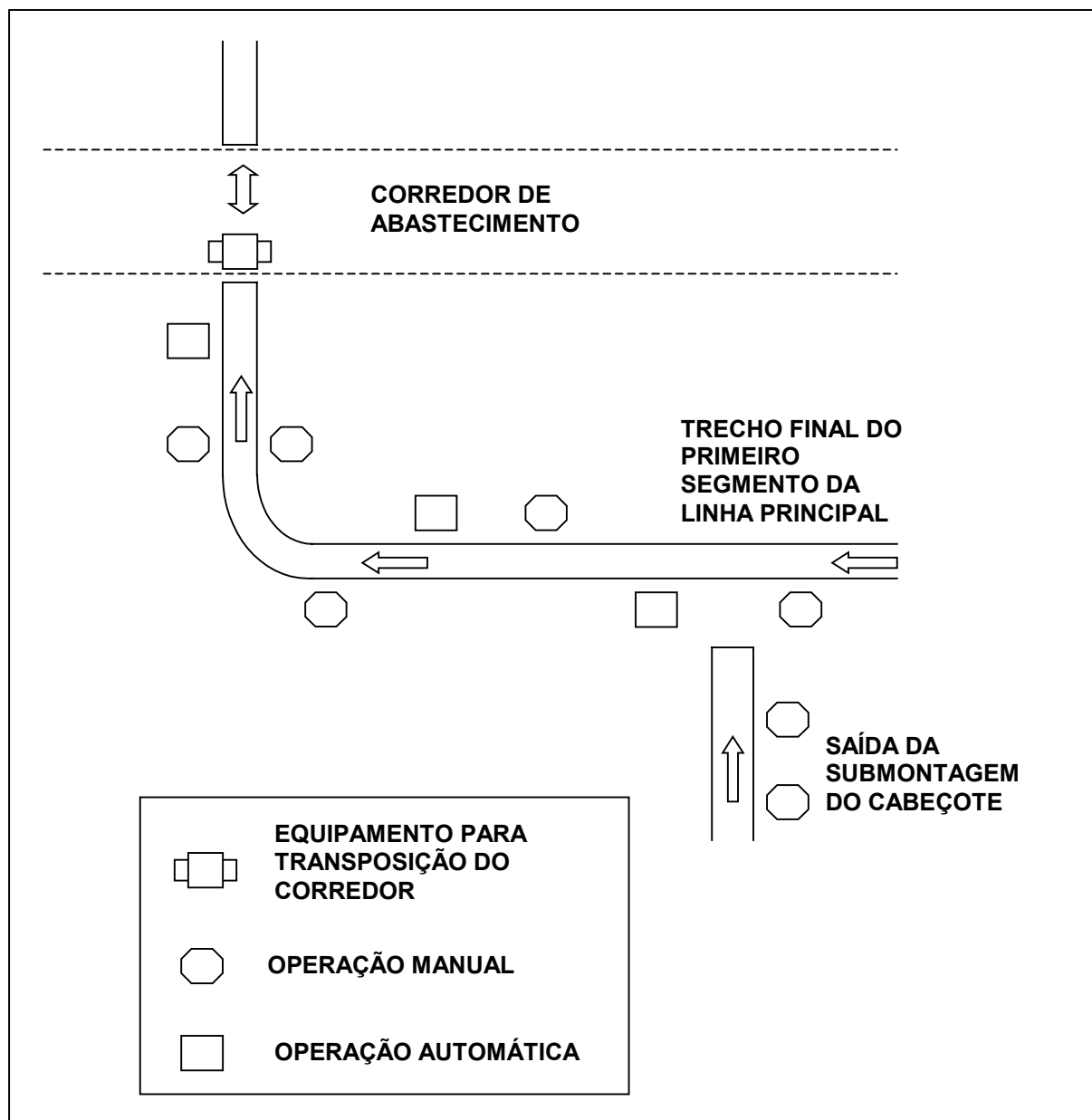


Figura 1 – Representação geral da linha de montagem de motores.



**Figura 2 – Detalhe do primeiro segmento da linha de montagem de motores.**

apenas em termos de animação, tais como o manuseio de peças com auxílio de dispositivos e gráficos de ocupação de operadores.

A aquisição de dados contemplou: tempos de operação para cada estação de trabalho; velocidade e comprimento de cada segmento de transportador; tempos de reparo e taxa de reprovação; disponibilidade e manutenibilidade (representadas respectivamente pelo tempo entre

paradas e pelo tempo de reparo) de máquinas e equipamentos. Embora a apresentação detalhada dos dados utilizados, como já mencionado, esteja além do escopo deste artigo, é necessário esclarecer alguns aspectos relacionados à coleta e análise de dados. Em primeiro lugar, a maior parte dos dados necessários não se encontrava disponível, pois tratava-se de um sistema de produção ainda em fase de projeto. Portanto,

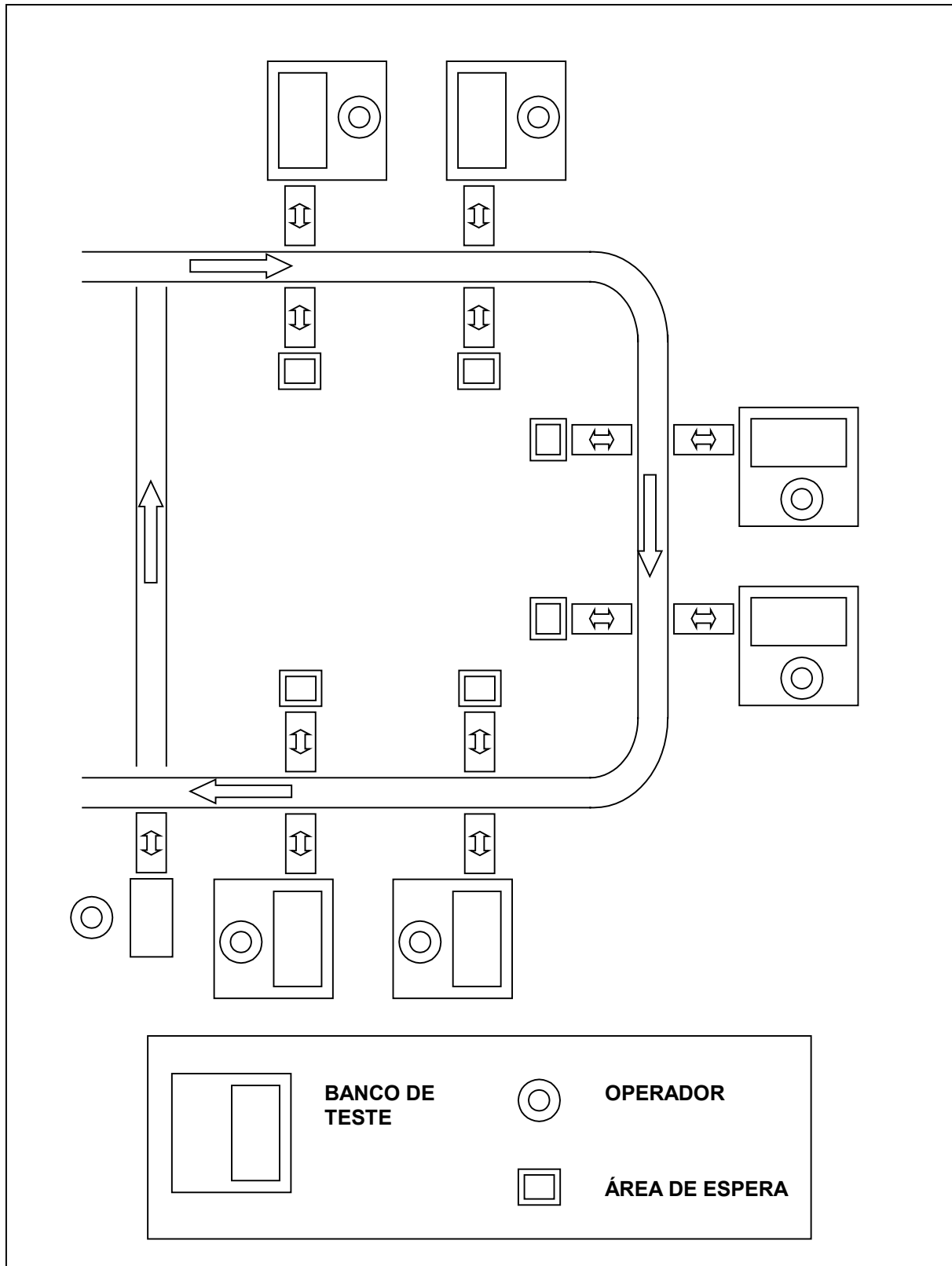


Figura 3 – Detalhe da área de teste a quente de motores.



foram empregadas estimativas para todos os dados utilizados, com exceção de velocidade e comprimento de transportadores e tempos de operações automáticas, baseados em especificações destes equipamentos.

Quanto aos tempos de operações manuais, empregaram-se tempos sintéticos, em que o tempo médio é calculado de acordo com os elementos a serem realizados por cada operador. O comportamento probabilístico baseia-se em amostras (folhas de cronometragem) de uma linha de montagem já existente, cujo tempo de ciclo é similar ao da nova linha. Empregando-se recursos de análise oferecidos pelo *software* utilizado (incluindo teste *chi*-quadrado e teste de *Kolmogorov-Smirnov*), conclui-se que em geral o tempo de uma operação manual comporta-se de acordo com uma distribuição normal, com desvio padrão correspondente a 10% da média aritmética. Assim, adotaram-se essa distribuição e a relação entre média e desvio padrão como hipóteses de comportamento probabilístico dos tempos de operações manuais.

Tempos de operações automáticos, assim como velocidade e capacidade de transportadores, pelas suas características, puderam ser considerados determinísticos, dispensando a adoção de qualquer outra hipótese. Tempos de retrabalho foram considerados como distribuições triangulares, adotando-se índices de rejeição constantes; em ambos, empregaram-se parâmetros sugeridos por especialistas familiarizados com o sistema. Finalmente, para os parâmetros de manutenção, foram empregadas estimativas dos fabricantes de máquinas e equipamentos para o tempo mínimo e máximo entre paradas e de reparo, utilizando-se distribuições uniformes. O emprego de distribuições uniforme e triangular para dados estimados empiricamente baseia-se em recomendação de PEGDEN *et al.* (1995).

## 5. Implementação do Modelo

A implementação do modelo foi realizada em duas fases: modelagem do processo básico

e modelagem das variações de processo. Na primeira fase, a variação dos tempos de operações manuais e os parâmetros de manutenção não foram considerados, e a capacidade foi ajustada com base na eficiência global esperada. Na segunda, todas as informações foram inseridas no modelo, e os resultados ganharam maior aderência com relação ao sistema real. Na verdade, a primeira fase serviu apenas à verificação e validação do modelo, por isso apenas o modelo da segunda fase foi submetido à análise de resultados. A validação incluiu alguns procedimentos formais, tais como testes de realismo, particularmente mediante experimentos com inclusão de dados extremos (por exemplo, um tempo de ciclo exageradamente elevado em qualquer estação deve resultar em capacidade proporcionalmente baixa), mas baseou-se principalmente em testes de validade aparente, empregando assim o conhecimento e experiência de pessoas familiarizadas com o processo de montagem do motor. Para uma descrição de tais procedimentos, ver PEGDEN *et al.* (1995).

A primeira fase – modelagem do processo básico – foi desenvolvida em três etapas, para facilitar a formulação, tradução, verificação e validação do modelo, quais sejam:

1. *processo primário*: representação da linha principal e demais subsistemas (com exceção do teste a quente) sem estações de trabalho.
2. *subsistema de teste a quente*: esta etapa consistiu de um estudo completo de Simulação, o que será apresentado posteriormente. Ao contrário das outras etapas, nessa foram considerados parâmetros de manutenção e variabilidade de operações manuais, embora tais fatores tenham sido retirados do modelo para que o mesmo fosse agregado ao restante da linha. Assim, apenas na segunda fase (processo probabilístico) tais elementos voltaram a ser incluídos.
3. *processo completo*: o modelo detalhado do subsistema de teste a quente e todas as posições de trabalho na linha principal foram agregadas ao modelo do processo primário.

Obviamente, uma apresentação detalhada dos modelos utilizados, desenvolvidos por intermédio do pacote *ARENA*, estaria além do escopo deste trabalho, mas deve-se mencionar que a programação em linguagem *SIMAN*, na qual se baseia o *ARENA*, consiste em dois arquivos: (a) *modelo* (representa a estrutura lógica do sistema e é composto por comandos gerados por módulos do tipo *Block*) e (b) *experimento* (constitui-se dos dados experimentais da Simulação e é gerados por módulos do tipo *Element*). Os modelos foram construídos mediante utilização de módulos de baixo nível (próximos da linguagem *SIMAN*), uma vez que detalhes operacionais, às vezes, não podem ser convenientemente representados por módulos de alto nível do *ARENA*. A diferença principal entre os módulos de baixo nível do *ARENA* e os comandos em *SIMAN* é que aqueles dispensam a definição de elementos do modelo. Isso significa que, tomando como exemplo a representação de uma localização (estação de trabalho), o *SIMAN* exige a definição de um objeto associado à localização (por meio de um módulo denominado *Station Element*, que integra o experimento) e de um evento associado à chegada de peças a esta mesma estação (módulo *Station Block*, que integra o modelo). No *ARENA*, tudo isso é permitido através da utilização de um único módulo, denominado *STATION*.

Uma outra razão para a utilização de módulos de baixo nível baseia-se no emprego de estruturas indexadas, para objetos do sistema que apresentam a mesma estrutura lógica e estão presentes em razoável quantidade, tais como células de teste a quente (6 unidades) e posições de trabalho comuns, isto é, que não envolvem a montagem de componentes provenientes dos diversos subsistemas adjacentes à linha principal (58 unidades). Tal estrutura facilita não apenas a tradução do modelo, mas também a verificação, validação e futuros ajustes do modelo para novas aplicações.

A capacidade resultou bastante próxima do valor esperado, pois disponibilidade e variabilidade não foram consideradas. Por valor esperado, entende-se a capacidade nominal da linha considerando ausência de fatores restritivos

(100% de eficiência). Nesse momento, também foram executados experimentos com diferentes números de paletes, para que seu número ótimo fosse estabelecido. Quando o número de paletes é menor que o nível ótimo, ocorre ociosidade nas posições de trabalho. Quando é maior, a variabilidade de cada operador irá causar bloqueios em diversos pontos da linha.

Para a segunda fase da implementação do modelo, que seria submetida a Análise de Resultados, foram incluídas duas categorias de dados:

- a) *parâmetros de manutenção*: disponibilidade (tempo de reparo ou de reposição) e manutibilidade (tempo entre paradas) de máquinas e equipamentos.
- b) *variabilidade de operações manuais*: todos os tempos de ciclo de operações manuais foram convertidos em distribuições normais, com desvio padrão correspondente a 10% do tempo elementar projetado, conforme anteriormente justificado.

## 6. Resultados

A determinação do número ideal de paletes (segundo objetivo do estudo), bem como a modelagem do processo básico – mencionada no item anterior –, foram na verdade consideradas integrantes da validação do modelo, enquanto a avaliação da interação homem-máquina nas células de teste a quente foi tomada como um estudo independente. Dessa forma, para a análise do modelo, restou o objetivo principal do estudo, ou seja, avaliar o impacto da disponibilidade de recursos e da variabilidade de operações manuais sobre o desempenho do sistema. Para tal, quatro experimentos tiveram seus resultados comparados:

- a) processo determinístico, disponibilidade não considerada (corresponde à modelagem do processo básico);
- b) processo probabilístico, disponibilidade não considerada;
- c) processo determinístico, disponibilidade considerada;
- d) processo probabilístico, disponibilidade considerada.

Por processo probabilístico entende-se a inclusão de distribuições normais para representação de tempos elementares manuais; por disponibilidade considerada entende-se a inclusão de dados de manutenção. O último experimento (processo probabilístico, disponibilidade considerada) representa o comportamento esperado do sistema real, e os demais destinam-se a fornecer uma melhor compreensão sobre o impacto isolado de variabilidade e disponibilidade sobre o desempenho do sistema. Experimentos adicionais foram realizados, baseados no processo probabilístico com disponibilidade considerada, visando a avaliar a sensibilidade do sistema com relação à disponibilidade de seus recursos. Dessa forma, o tempo entre falhas foi reduzido, o que permitiu avaliar o comportamento da linha sob condições críticas de disponibilidade.

Antes de prosseguir com os resultados do estudo, é importante esclarecer que considerou-se, durante a construção e experimentação do modelo, que o sistema é do tipo não-terminal (pois as peças acumuladas ao final de cada turno de trabalho são mantidas no sistema), empregando-se 200 replicações – número necessário para assegurar confiabilidade do experimento –, cada uma equivalente a 1 dia de trabalho (2 turnos de 8 horas), e período de “aquecimento” (*warm-up*) de 4 horas (necessário para equilíbrio de tempo de fluxo e tempo de ciclo no final da linha). Tais pressupostos foram submetidos a análise de covariância e autocorrelação, e a seleção do tamanho de lote do experimento (duração de cada replicação) visa a fornecer a medida de capacidade de produção numa unidade facilmente assimilável para as pessoas envolvidas no projeto (motores por dia). Durante a análise de resultados foram verificados os intervalos de confiança e observado o comportamento das médias móveis dos parâmetros empregados (capacidade e tempo de fluxo), que se mostraram satisfatórios, e foram utilizados histogramas para uma clara visualização do comportamento dinâmico do sistema.

A Tabela 2 a seguir apresenta um sumário dos resultados obtidos. Neste ponto, deve-se

esclarecer que a coluna “fator de disponibilidade” indica a maneira como foi considerado o parâmetro de disponibilidade (tempo entre paradas): fator igual a 0 significa que disponibilidade (e manutenibilidade) não foi considerada; igual a 1 representa tempo entre reparos estimado; fator 2 ou 5 significa que todos os valores para o tempo entre reparos foram divididos por 2 e 5, resultando em redução da eficiência do sistema. A coluna “variabilidade” indica apenas se os tempos elementares foram representados por valores médios ou distribuições probabilísticas, isto é, se o experimento possui ou não variabilidade nas operações manuais. Um número muito maior de experimentos poderia ter sido realizado, mas isso foi restringido pelo prazo do estudo e pela restrição de recursos computacionais.

A análise de resultados levou às seguintes conclusões:

1. A variabilidade das operações manuais origina uma perda de capacidade em aproximadamente 6%, e representa fator crítico para o desempenho do sistema. Foi observado posteriormente, pela análise de sensibilidade, que o tempo de operação manual em cada estação de trabalho deveria ser limitado a 90% do tempo de ciclo da linha de montagem, para evitar perda sensível de capacidade.
2. A redução da disponibilidade não causa impacto representativo sobre a capacidade média, mas sobre a proporção de períodos (dias ou turnos) com baixa produção. Logo, é necessário um determinado nível de estoque protetor (*buffer*) no final da montagem para manter a capacidade do sistema.
3. Deve ser mantido um número específico de paletes sobre a linha principal, para otimizar a capacidade de produção. A simulação confirmou que um número maior de paletes não garante maior capacidade, ao contrário do que afirmavam muitas pessoas “familiarizadas” com o sistema. Assim, a produção cresce com o aumento do número de paletes até atingir um nível ótimo, no qual a capaci-

**Tabela 2 – Resultados do modelo da linha de montagem.**

variabilidade	fator de disponibilidade	capacidade (motores/dia)		tempo de fluxo (min)	
		média	mínimo	média	máximo
não	0	954	945	97	619
sim	0	893	886	104	638
não	1	949	804	97	1090
sim	1	889	740	104	676
sim	2	884	731	107	935
sim	5	870	665	132	1039

dade se estabiliza. Se um número maior de paletes for acrescentado, a capacidade diminui gradualmente.

### 7. Modelo da Área de Teste a Quente

O subsistema de teste a quente, composto por seis células de teste, recebeu um tratamento detalhado, para que a interação entre homem e máquina fosse avaliada sob condições dinâmicas e probabilísticas. Assim, pretendia-se demonstrar que a necessidade de mão-de-obra não deveria ser superior a um homem para cada duas células, ao contrário da opinião de diversas pessoas envolvidas no projeto.

O tratamento diferenciado recebido pela área de teste a quente também se deve ao fato de que a operação de teste é composta por diversas atividades manuais e automáticas intercaladas. Dessa maneira, cada atividade necessita ser explicitamente modelada, inclusive o deslocamento do operador entre os dois bancos de teste aos quais ele se encontra alocado. Nas demais áreas da linha de montagem, o detalhamento alcança apenas o nível da operação, não sendo necessário representar seus elementos.

Denomina-se célula de teste o conjunto formado por um banco de teste e por uma área de espera a ele interligada. Assim, o subsistema de teste a quente consiste em seis bancos de teste e seis áreas de espera, além do transportador

principal e da área de reparo. Cada paleta movimentada-se através de diversos pontos de interligação, cada um associado a uma diferente célula de teste. Em cada ponto de interligação, é verificada a disponibilidade do banco de teste. Caso este esteja ocupado, verifica-se a área de espera; se a mesma também estiver ocupada, o motor é deslocado até o próximo ponto de interligação, e assim sucessivamente até encontrar uma posição disponível. Após o teste, o motor percorre o transportador até o ponto de saída, ignorando as demais células. Se o motor for reprovado, será encaminhado até a bancada de reparo e, uma vez reparado, será novamente direcionado a uma célula de teste (ver Figura 3).

Com relação à formulação, tradução, verificação e validação do modelo, assim como à coleta e análise de dados, considerem-se os mesmos esclarecimentos apresentados para a linha de montagem (item 4). A capacidade média do sistema manteve-se nitidamente superior ao da linha de montagem, assim como sua capacidade mínima. Considerando-se o tempo de ciclo médio de teste, o sistema global possui uma eficiência de aproximadamente 98%, devido a sua configuração em paralelo, que lhe permite absorver o impacto da variabilidade das operações manuais e das paradas de equipamentos.

Deve-se lembrar que, no modelo da área de teste a quente, o objetivo consistia em avaliar a interface homem-máquina. Isso é possível

mediante a representação detalhada das atividades manuais, conforme já explicado, e pela observação do nível de ocupação dos operadores. Uma vez que essa variável se manteve estável, em torno de 75%, conclui-se que a alocação de um operador para cada duas células é adequada, o que representa uma economia de três operadores por turno de trabalho em relação à sugestão de se empregar um operador por célula, proposta por algumas pessoas envolvidas.

### 8. Considerações Finais

Deve-se esclarecer que um nível maior de detalhamento em animação foi implementado no modelo após a análise de resultados. Tal detalhamento incluiu, por exemplo, deslocamento de operadores e manuseio de componentes, e permitiu melhor aceitação dos resultados obtidos.

Outro aspecto relevante diz respeito a algumas medidas de desempenho utilizadas pela Ford, denominadas *FPS metrics (Ford Production System metrics)*, ou medidas do Sistema de Produção Ford). Algumas dessas medidas puderam ser avaliadas parcialmente por meio dos modelos de simulação, tais como *tempo de fluxo total* (integra uma medida mais ampla que o tempo de fluxo avaliado na simulação, pois engloba também o tempo de permanência em estoque, antes e após o processo), *precisão de programação* (foi possível observar o nível de produção não atendida em cada dia útil) e *eficiência global* (ou simplesmente eficiência, definida pela relação entre capacidade observada e capacidade considerando a não-ocorrência de falhas e variações). Embora tais medidas tenham sido formuladas para acompanhamento e direcionamento de atividades de melhoria contínua, sua inclusão nos modelos foi útil para

auxiliar a transmissão de novos conceitos de produção adotados pela empresa.

### 9. Conclusão

Uma Simulação apresenta, além dos recursos de análise, um benefício genérico: permite que se amplie o conhecimento e a compreensão sobre um sistema de produção existente ou ainda em fase de projeto. Dessa forma, o estudo abordado neste trabalho permitiu que diversas pessoas envolvidas no projeto da linha de montagem discutissem aspectos relevantes do sistema. Por outro lado, quatro benefícios importantes devem-se à Simulação:

- a) o tempo normal em cada estação de trabalho manual foi limitado a 90% do tempo de ciclo, resultando em maior capacidade;
- b) o número de paletes foi otimizado, permitindo redução de investimento.

Conforme mencionado na introdução, a Simulação pode ser considerada uma abordagem bastante satisfatória quando se pensa em termos de projeto de um sistema de produção complexo. Neste artigo, foram apresentados alguns detalhes do funcionamento de uma linha de montagem, pretendendo-se com isso ilustrar a complexidade de um sistema de produção, o que normalmente dificulta a aderência dos modelos desenvolvidos para sua avaliação ou otimização. Portanto, em que pese a existência de muitos modelos otimizantes e heurísticos de balanceamento de linhas, parece razoável supor, no contexto prático em que o estudo foi realizado, que nenhuma dessas abordagens permite avaliar apropriadamente e com detalhes todos os aspectos importantes de um sistema de produção complexo, como o apresentado, de maneira tão eficaz como a Simulação.

### Referências Bibliográficas

ASKIN, R.G. & STANDRIDGE, C.R.: *Modeling and Analysis of Manufacturing Systems*, New York, John Wiley & Sons, 1993.

BUFFA, E.S.: *Modern Production and Operations Management*, 7ª ed., New York, John Wiley & Sons, 1983.

- BUFFA E.S. & MILLER, J.G.:** *Production-Inventory Systems: planning and control*, 3ª ed. Homewood, IL, Richard D. Irwin, 1979.
- HENDRICKS, K.B. & MCCLAIN, J.O.:** “The Output Processes of Serial Production Lines of General Machines with Finite Buffers”, *Management Science*, v.39, n.10, p.1194-1201, Oct. 1993.
- HILLIER, F.S.; SO, K.C. & BOLING, R.W.:** “Toward Characterizing the Optimal Allocation of Storage Space in Production Line Systems with Variable Processing Times”, *Management Science*, v.39, n.1, p.126-133, Jan. 1993.
- HONG, Y.; GLASSEY, C.R. & SEONG, D.:** “The Analysis of a Production Line with Unreliable Machines and Random Processing Times”, *I.I.E. Transactions* (Institute of Industrial Engineering), v.24, n.1, p.77-83, Mar. 1992.
- KALIR, A. & ARZI, Y.:** “Optimal Design of Flexible Production Lines with Unreliable Machines and Infinite Buffers”, *I.I.E. Transactions* (Institute of Industrial Engineering), v.30, n.4, p.391-399, Apr. 1998.
- LAW, A.M. & KELTON, W.D.:** *Simulation Modeling and Analysis*. 2ª ed. New York, McGraw Hill, 1991.
- MUSSELMAN, K.J.; MARTIN, D.L. & BROUSE, J.:** “Applying Simulation to Assembly Line Design”. In: HURRION, R.D.: *Simulation: Applications in Manufacturing*, IFS Publications, Bedford (Reino Unido), 1986.
- PEGDEN, C.D.; SHANNON, R.E. & SADOWSKI, R.P.:** *Introduction to Simulation using SIMAN*, 2ª ed. New York, McGraw Hill, 1995.
- PRITSKER, A.A.B.:** *Introduction to Simulation and SLAM-II*, 3ª ed. New York, John Wiley & Sons, 1986.
- SHANNON, R.E.:** “The Strategic Use of Simulation in Manufacturing”, *Proceedings of the 1989 Winter Simulation Conference*, 1989.

## ***AN ENGINE ASSEMBLY LINE SIMULATION***

### ***Abstract***

*Simulation has been proven to be very useful on the solution of complex problems, like those ones relating product-oriented manufacturing systems (assembly and manufacturing lines). This paper presents an application concerning design evaluation of a new engine assembly line at Ford of Brazil.*

***Key words:*** *capacity planning, product-oriented manufacturing systems, engine assembly line, line balancing, manufacturing simulation.*