

# Balanceamento de montagens integrando o método CPM à simulação

Guilherme Ernani Vieira (PETROBRAS) - g.e.vieira@hotmail.com  
• Av. República do Chile, 330, 8º andar, Torre Leste, 20031-170, Rio de Janeiro-RJ  
André Brajão (PUCPR – PR/Brasil) - andrebrajao1@gmail.com

**RESUMO** A manufatura enxuta é baseada na filosofia de reduzir o desperdício, isto é, produzir o modelo correto, no momento, quantidade e qualidade corretos. A manufatura clássica explora ao máximo a utilização das máquinas e postos de trabalho. Os resultados são maiores quantidades de peças em processo para justificar o tempo de preparação da máquina ou posto gargalos. Planejar requer maior entendimento sobre o impacto de cada atividade nos resultados. O método CPM possibilita explorar as relações das atividades com o lead-time – L.T. Este artigo apresenta a manufatura enxuta com o uso do método CPM (Critical Path Method) para obter melhor lead-time. A principal contribuição deste trabalho foi reduzir 50% do inventário em processo e aumentar em 155% a produção de peças. A pesquisa objetivou estudar a produção de produtos com demanda variável a fim de aumentar a capacidade utilizando a técnica do caminho crítico para explorar as relações do processo com os recursos humanos e o método de trabalho com diferentes tamanhos de lote. Foram analisadas diferentes quantidades de lote e trabalhador para atender a demanda atual e futura. A proposta de utilização do método CPM foi avaliada através de simulações computacionais com dados reais de montagem de bombas de alta pressão.

**Palavras-chave** Balanceamento. Produção Enxuta. Método CPM. Simulação.

**ABSTRACT** *Lean production is based on the philosophy of reducing waste i.e. to produce the correct model, at the right moment, in the correct amount and quality. Classic production explores the maximum use of machinery and workstations. This results in a greater volume of parts in the process in order to justify the time in preparation of the machine or the bottleneck position in the production line. Planning requires a greater understanding of the impact of each activity in the results. The CPM method allows us to explore the respective relationships between activities in lead-time – L.T. This article presents a Lean Production using the Critical Path Method – CPM in order to obtain a better lead-time. The main contribution of this work was in achieving a 50% reduction in the inventory used in the process and an increase of 155% in the production of parts. The research had the purpose of studying the manufacture of products, which had a variable demand in order to increase the capacity using the Critical Path Technique and to explore the relationship of the process with that of the human resources and the work method with different batch quantities. Different batch quantities and methods of work used to meet both the current and future demand were studied. The proposal for using the CPM method was evaluated through computer simulations using real data from the assembly of high-pressure pumps.*

**Keywords** *Balance. Lean Production. CPM Method. Simulation.*

## 1. INTRODUÇÃO

O conceito de *lead-time*, importante para a filosofia da manufatura enxuta, utiliza a premissa comum à metodologia CPM. Nesta, o correto uso dos recursos, a eliminação das paradas indesejáveis, a redução dos desperdícios de recursos humanos ou máquinas, entre outros, são importantes meios para alcançar melhores resultados.

O método CPM, inicialmente chamado de *Critical Path Planning and Scheduling*, foi idealizado no fim da década de 50 e permitiu reduzir o tempo das paradas da fábrica DuPont utilizando os computadores da época.

O planejamento, com a modernização tecnológica da manufatura, tornou-se mais complexo e variado na questão de modelos e demandas. O processamento, que envolve maior número de atividades, também é mais complexo e requer maiores esforços para se planejar adequadamente os postos de trabalho e máquinas.

O estudo foi realizado em manufatura com demanda variável entre modelos. O produto final é a bomba de alta pressão para equipamentos de limpeza profissional. Todos os postos de trabalho processam variações do produto. São necessários *setups* entre modelos.

O Método do Caminho Crítico permite compreender como determinada atividade impacta no planejamento da produção e a simulação por computador será utilizada para propor melhorias. A utilização da simulação permite identificar restrições na quantidade de peças produzidas dentro de um intervalo de tempo e os recursos humanos necessários para se atender as diferentes demandas. Espera-se que o *lead-time* tenha influência na quantidade de peças finais produzidas e possibilite o nivelamento da produção.

Nas últimas décadas foram publicados resultados significativos sobre a utilização do método CPM. Segundo Slack *et al.* (*apud* MIRANDA, 2010), o método CPM facilitou o gerenciamento de projetos complexos de defesa e construção civil devido às incertezas e o grande número de atividades envolvidas. Miranda (2010) acrescenta que o critério tempo relacionado ao método CPM é muito utilizado em gerenciamento destes projetos complexos. Segundo Weaver (2006), Morgan R. Walker e James E. Kelley comprovaram, utilizando o método CPM, que recuperar atrasos nos projetos excedendo largamente o número de pessoal no projeto não é a melhor maneira de fazê-lo, e ainda demonstraram que focar-se em atividades específicas pode recuperar atrasos sem aumento significativo dos custos. Outra forma proposta por Shigeo (1996) foi produzir somente o necessário eliminando os estoques intermediários para obter redução drástica dos tempos de atravessamento. Para produzir lotes menores é necessário melhorar a sincronização entre processos, utilizando a troca rápida de ferramenta e transportando itens em lotes unitários, para evitar a superprodução.

O Diagrama de Precedência com flechas descreve o relacionamento entre as atividades e é utilizado para analisar visualmente a sincronização dos processos e construção do modelo virtual. A simulação por computador permite propor melhorias em diferentes cenários virtuais, comparar e selecionar os melhores resultados. Os problemas e ações desencadeadas no decorrer do trabalho servem para orientar sugestões de melhorias para trabalhos futuros.

A principal contribuição deste trabalho foi reduzir 50% do inventário em processo e aumentar em 155% a produção de peças. A pesquisa objetivou estudar a produção de produtos com demanda variável a fim de aumentar a capacidade utilizando a técnica do caminho crítico para explorar as relações do processo com os recursos humanos e o método de trabalho com diferentes tamanhos de lote.

Este artigo está organizado da seguinte forma. Na seção 2 estão apresentados os conceitos básicos sobre o Método do Caminho Crítico, simulação, produção enxuta e balanceamento. Na seção 3 está apresentada a metodologia para simulação do cenário de montagem atual. Na seção 4 estão apresentados os resultados obtidos por simulação e as análises feitas. Na seção 5 estão apresentadas as considerações finais do projeto e sugestões para trabalhos futuros.

## 2. REFERENCIAL TEÓRICO

Nesta seção, algumas das ferramentas tratadas neste artigo são apresentadas: O Método do Caminho Crítico, a simulação, a produção enxuta e o balanceamento.

### 2.1. O Método do Caminho Crítico

As origens do método CPM datam de 1956 no início da era dos computadores para fins comerciais quando houve uma necessidade de descobrir aplicações úteis para estes recém chegados computadores da época. A ideia de planejar, estimar e programar foi então viabilizada por Morgan R. Walker e James E. Kelley, que no ano de 1959 apresentaram o método chamado de *Critical Path Planning and Scheduling* - tema da Conferência *Eastern Joint Computer*. Este método foi utilizado em computadores na fábrica da DuPont em 1957 possibilitando economizar 25% das paradas da fábrica. Atualmente é utilizado manualmente em trabalhos de pesquisa e para fins didáticos (WEAVER, 2006).

Torna-se fácil, pelo Método do Caminho Crítico, visualizar um conjunto de operações iniciando-se em sequência para atingir um objetivo. Após serem identificadas as atividades, elas podem ser representadas e ordenadas em um Diagrama de Rede.

O Diagrama de Rede, também conhecido como “Diagrama de Precedência”, foi publicado em 1961 por John Fondahl. Consiste em uma forma manual alternativa de aplicar o método CPM evitando os altos custos dos sistemas baseados em computador daquela época (WEAVER, 2006).

Weaver (2011) apresentou dois pontos importantes sobre as limitações para esta metodologia de Walker e Kelley, que são:

- a) A base de cálculo é incerta porque utiliza estimativa de único ponto;
- b) Não permite variações lógicas tipo *loop* e condicionais para tratar de atividades como retrabalhos e falhas de teste.

Para Leal e Oliveira (2011), as limitações do método CPM levaram ao surgimento de novas soluções, como a simulação visual e virtual. Destacou-se também o *software* Arena e a simulação de eventos discretos.

### 2.2. Simulação por computador

Simular é um método de estudar o comportamento e as reações de determinados sistemas utilizando modelos. Os computadores são importantes aliados da simulação porque são capazes de criar um ambiente virtual para testar as teorias. Efetuam os cálculos necessários para a interação do ambiente virtual com o objeto em estudo e apresentam os resultados do experimento no formato desejado pelo analista. Desta forma, é possível uma análise de sistemas sem a necessidade de interferí-los, pois todas as mudanças e consequências, por mais profundas que sejam, ocorrerão apenas com o modelo computacional e não com o sistema real (PRADO, 2008).

O conceito de simulação também pode ser descrito como uma tentativa de replicar ou imitar formas do comportamento de um sistema real ou projetado utilizando o modelo matemático desenvolvido em computador. Segundo Hollocks (1992), a simulação é uma técnica de pesquisa operacional que envolve a criação de um programa computacional representando alguma parte do mundo real em que experimentos no modelo original predizem o que acontecerá na realidade.

Simulação não é uma tecnologia tão recente. Schriber (1974) já dizia que simulação implica na modelagem de um processo ou sistema, de tal forma que o modelo imite as respostas do sistema real numa sucessão de eventos que ocorrem ao longo do tempo. Shannon (1975), também afirmou que simulação é quase sinônimo de simulação digital, na qual um modelo computacional é executado. Para ele, a simulação pode ser definida como um programa de computador cujas variáveis apresentam o mesmo comportamento dinâmico e estocástico do sistema real que representa.

A simulação tem a vantagem de proporcionar um estudo de baixo custo, visto que, todo o trabalho que seria executado de fato é testado no computador. Permite avaliar inúmeros cenários para encontrar as soluções alternativas para o sistema em estudo.

Em simulação é desenvolvido o modelo lógico-matemático que representa a dinâmica do sistema em estudo. Ele normalmente incorpora valores para tempos, distâncias, recursos disponíveis, etc. No *software* Arena, que será trabalhado neste projeto, a modelagem é feita visualmente com objetos orientados à simulação, com o auxílio do mouse e teclado.

Algumas justificativas para a utilização da simulação:

- a) Reduzir os custos de estoques, dimensionando-os corretamente de acordo com o planejamento da produção;
- b) Aumentar o desempenho de processos já existentes;
- c) Garantir que novos processos sejam testados e aprovados antes de suas realizações;
- d) Obter o máximo aproveitamento de recursos e de pessoal;
- e) Obter os melhores resultados de logística com sua cadeia de fornecedores;
- f) Prever o comportamento futuro, isto é, os efeitos produzidos por alterações no sistema ou nos métodos empregados em sua operação (PEDGEN *et al.*, 1990);
- g) Estudar a utilização da capacidade instalada, níveis de inventários, lógica de controle, refinamento de projeto, integração, sequenciamento, gargalos do sistema, melhor arranjo físico e melhor índice de produtividade dos funcionários (LOBÃO e PORTO, 1996).

Algumas vantagens da simulação:

- a) Uma vez criado o modelo de simulação, pode-se fazer várias alterações ou modificações para avaliar projetos e políticas propostas;
- b) Permite a análise de longos períodos em um curto espaço de tempo;
- c) O desenvolvimento do modelo de simulação ajuda na organização ao separar os parâmetros controláveis daqueles que não são controláveis e estudar a influência de cada um deles sobre os sistemas;
- d) Hipóteses sobre como, ou o porquê de certos fenômenos acontecerem podem ser testadas para confirmação (PEDGEN *et al.*, 1990);
- e) Um estudo de simulação apresenta como realmente um sistema opera, em oposição à maneira com que todos pensam que ele opera (BANKS; CARSEN, 1984);
- f) Permite a análise de sensibilidade do tipo *what-if*, comparando várias políticas de decisão testadas rapidamente (CORRÊA *et al.*, 2001);
- g) Ferramenta de apoio à decisão permitindo que soluções potencialmente boas sejam encontradas evitando a prática de regras intuitivas (*rules of thumb*) (CORRÊA *et al.*, 2001).

Algumas desvantagens da simulação:

- a) Um bom modelo de simulação pode tornar-se de alto custo e levar vários meses para o seu desenvolvimento, especialmente quando os dados são de difícil obtenção;
- b) A simulação não gera bons resultados sem *inputs* adequados;
- c) Os resultados da simulação são, algumas vezes, de difícil interpretação. Uma vez que os modelos tentam capturar a variabilidade dos sistemas, é comum que existam dificuldades em determinar quando uma observação teve alguma relação significativa no sistema ou a processos aleatórios construídos e embutidos no modelo (PEDGEN *et al.*,1990);
- d) A construção do modelo requer treinamento especial. O aprendizado se dá ao longo do tempo, com a aquisição de experiência (BANKS; CARSEN, 1984).

### 2.3. Produção enxuta e balanceamento

A produção enxuta, inicialmente conhecida como manufatura *just-in-time* (JIT), se originou da filosofia do Sistema Toyota de Produção introduzido por Taiichi Ohno para enfrentar as dificuldades econômicas japonesas na década de 50. Diferente dos sistemas de produção em massa, como o sistema Ford, a manufatura JIT quebrou paradigmas a respeito do conceito de produção, buscando continuamente eliminar desperdícios e focando nas atividades que realmente agregam valor ao cliente. A flexibilidade pode ser obtida com fluxo de produção unitário que proporciona, dentre outros, a redução de inventário, o nivelamento da programação da produção. O *lead-time* mais curto possibilita planejar a produção para atender o cliente com variedades de produtos (MOURA, 1989).

A produção empurrada, também conhecida como clássica, processa ordens com grandes quantidades de peças. O trabalho é dividido para aproveitar os tempos de preparação de máquinas fabricando peças em excesso. Geralmente são produzidas peças para estocar um pulmão estratégico nos gargalos. Neste caso, o sistema de produção colabora para desestabilizar a programação da montagem final por causa da dificuldade de enviar a peça certa no lugar certo. Além disso, alterações no programa da manufatura clássica não permitem tempo de reação para estabilizar o processo novamente (SMALLEY, 2007).

Produzir lotes menores estabelece as bases para um nivelamento entre a produção e a demanda (HAY, 1988). Neste sentido, para se trabalhar com lotes menores e controlar o fluxo, Smalley (2006) utiliza sistemas puxados.

Cusumano (1989) acredita que a tendência de balancear a produção apresenta-se como uma das formas de conseguir fabricar lotes menores de produção.

Enquanto isso, Moura (1989) entende que o nivelamento da produção serve para conseguir flexibilidade de modelos de produto sem prejudicar o programa mensal. Deve-se alternar entre modelos para se atender maior variedade dos produtos ao dia.

Para Liker (2005), deve-se eliminar tudo que for desperdício para nivelar o programa da produção. Desperdícios, como por exemplo: superprodução, espera, transporte desnecessário, excesso de estoque, movimento desnecessário, defeitos e a não utilização da criatividade dos funcionários. A produção deve estar organizada de modo diferente do sistema clássico. Todos os equipamentos devem processar todas as variações do planejamento da produção.

Segundo Mishra e Manoria (2012) a redução do *lead-time* está relacionada com o balanceamento de linha obtido pela redução do ciclo da produção ou das estações de trabalho. Os resultados podem ser obtidos por definição das tarefas de acordo com a relação de precedência e/ou restrições independentes de cada estação de trabalho. As atribuições das tarefas para as estações de trabalho devem minimizar o tempo de espera e o trabalho de cada estação deve estar próximo do tempo de ciclo.

Todas as restrições conhecidas sobre o processo serão consideradas na elaboração dos modelos de simulação em *software* Arena, caso o contrário, o modelo não corresponderá à realidade do processo e, conseqüentemente não poderá ser validado para análises de novos cenários.

### 3. METODOLOGIA DO PROJETO

Considera-se que os recursos humanos estão disponíveis 528 minutos por dia, e descansam outros 60 minutos para o almoço. O *layout* e os postos de trabalho serão mantidos os mesmos porque o objetivo inicial é reduzir o *lead-time* pelo programa de produção. Para a realização deste trabalho foi seguida a seguinte metodologia:

- 1) Análise das atividades e estudo dos tempos;
- 2) Identificação das restrições do sistema;
- 3) Elaboração do Diagrama de Precedência do estado atual;
- 4) Construção do modelo virtual;
- 5) Validação do modelo virtual;
- 6) Indicadores da produção.

#### 3.1. Análise das atividades e estudo dos tempos

As atividades foram registradas em folha de verificação utilizando o método de observação direta da produção. As informações do processo referentes às restrições e afinidades propostas pelo Método do Caminho Crítico foram registradas.

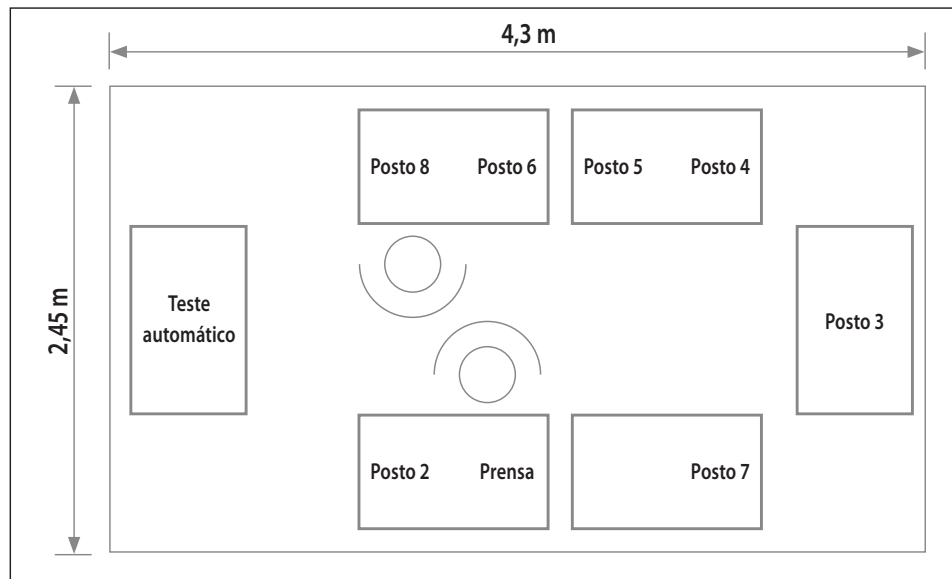
As informações da folha de verificação foram organizadas por tarefas de “A” a “V”, levando-se em consideração respectivamente o posto, dependências e tempo expresso em segundos. O tempo foi calculado como sendo o resultado da média aritmética de seis tomadas de tempo utilizando-se um cronômetro digital com escala de milésimos de segundo. As tarefas estão apresentadas no Anexo 1.

#### 3.2. Identificação das restrições do sistema de produção

As restrições foram identificadas por observação direta do processo. Seus registros feitos em folha de verificação fazem parte da construção do cenário virtual para posterior validação do modelo.

O *layout* apresentado na Figura 1 logo abaixo, facilitou a organização das informações sobre duas ou mais tarefas compartilharem o mesmo posto ou recurso. Deste modo, as análises posteriores como modelo virtual puderam representar melhor o possível o sistema real.

Figura 1 – Postos de trabalho da linha de montagem de bomba profissional.



Fonte: Autor.

O Quadro 1 a seguir apresenta as restrições de capacidade de recursos humanos por posto.

Quadro 1 – Restrições da linha de montagem de bomba profissional.

Posto de Trabalho	Restrição
Prensa	Único trabalhador
Posto 2	Simultaneamente até 3 trabalhadores
Posto 3	Único trabalhador
Posto 4	Único trabalhador
Posto 5	Simultaneamente até 2 trabalhadores
Posto 6	Único trabalhador
Posto 7	Único trabalhador
Posto 8	Único trabalhador
Teste automático	Único trabalhador

Fonte: Autor.

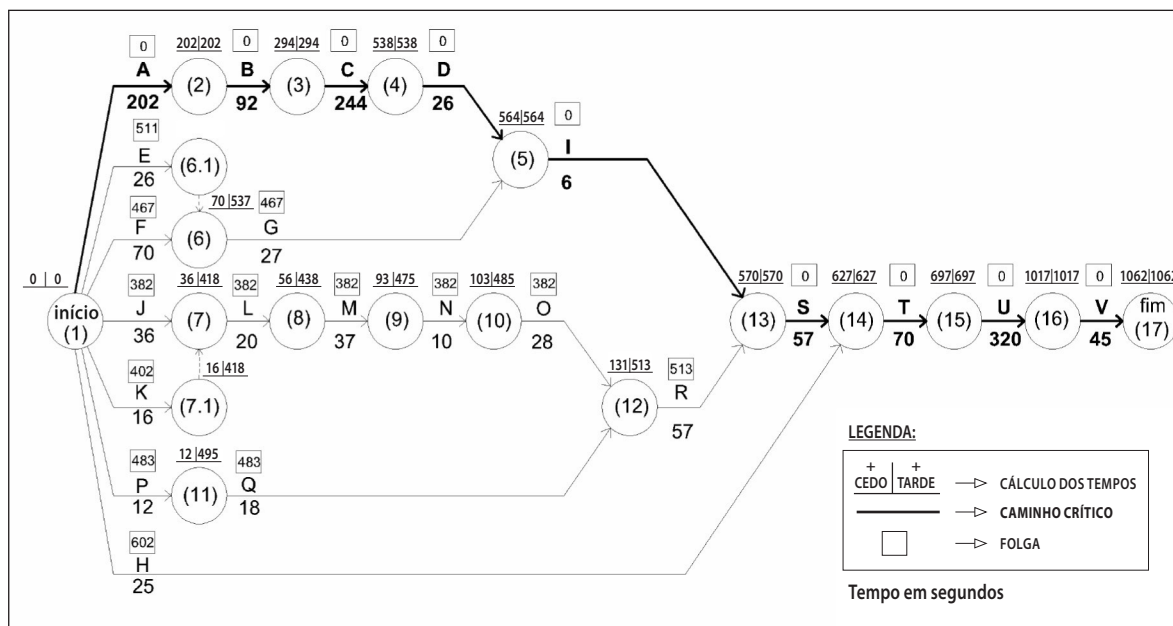
As restrições dos desbalanceamentos de operador estão consideradas. Na sequência estão apresentadas as restrições de balanceamento:

- a) O *setup* para a troca de dispositivos entre modelos é feito no posto prensa;
- b) No posto 2 as tarefas “E” e “F” são paralelas;
- c) No posto 5 as tarefas “M” e “N” são em série;
- d) No teste automático as tarefas “T”, “U” e “V” são em série dependentes. A tarefa “U” é automática e não requer a atenção do trabalhador;
- e) No posto 8 as tarefas “R” e “S” são restringidas pelas tarefas “H” e “I”.

### 3.3. Elaboração do Diagrama de Precedência do modelo atual

Com base nas informações do Anexo 1 foi elaborado o Diagrama de Precedência, apresentado na Figura 2.

Figura 2 – Diagrama de Precedência das atividades da linha de bomba profissional.



Fonte: Autor.



### 3.4. Construção do modelo de simulação virtual (no *software* ARENA)

Com base nas informações apresentadas nos itens 3.1., 3.2. e 3.3., deste artigo, foi modelado o cenário atual utilizando o *software* ARENA. Para validação utilizou-se o indicador de “número médio de peças produzidas por dia”.

Outras análises foram realizadas variando-se o modelo de simulação utilizando os comandos avançados de programação apresentados por Prado (2008) com o objetivo de obter melhorias no planejamento da produção.

Sabe-se que o tempo do caminho crítico para compor o programa de produção dependerá das seguintes informações:

- a) O número de trabalhadores envolvidos na linha (*input* via teclado);
- b) Quantidade do lote (*input* via teclado);
- c) Restrições da capacidade e balanceamento - modelagem no *software* Arena via programação avançada – Prado (2008).

### 3.5. Validação do modelo

Para validação do modelo do cenário atual utilizou-se o indicador “número médio de peças produzidas por dia”, ou simplesmente PD (produtividade diária), que representa no processo real 20 peças por dia. As parametrizações dos resultados em *software* Arena consideraram simulação para 10 dias de produção.

Os tempos das atividades no processo real foram cronometrados e suas médias e distribuições probabilísticas foram estimadas e inseridas no modelo de simulação. Foram feitas várias rodadas e correções no modelo de simulação até os resultados obtidos experimentalmente, principalmente a PD, representarem os valores reais. Testes foram aplicados com nível de confiança de 95% validando o modelo de simulação desenvolvido.

### 3.6. Indicadores da produção

Os experimentos de simulação verificarão a influência do acréscimo de mão de obra – M.O. no sistema, e sua relação com diferentes quantidades de peças por lote. Serão observados os indicadores:

- a) Quantidade de peças produzidas – Produção ou PD (*output* do *software* Arena);
- b) *Lead-time* – LT (*output* do *software* Arena);
- c) Quantidade de trabalhadores (*output* do *software* Arena);
- d) Custo  $\Sigma$ M.O. / PD – Custo base atual (custo cenário / custo base atual %).

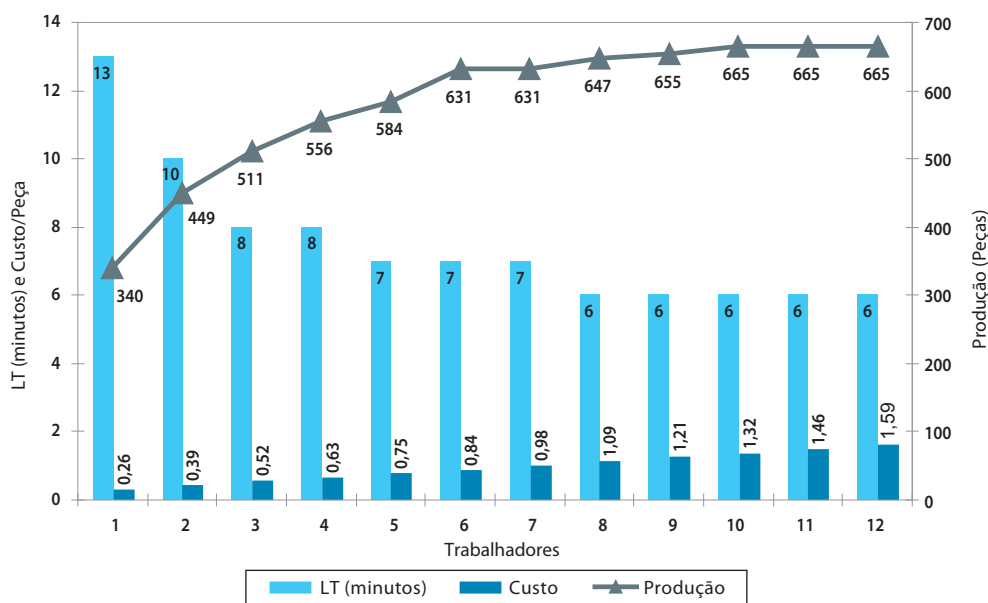
## 4. MODELOS E PRINCIPAIS RESULTADOS

O caminho crítico, linha mais escura destacada na Figura 2 do item 3.3, está considerado no modelo desenvolvido no *software* Arena. Quaisquer atrasos nas tarefas deste caminho crítico resultarão em maior tempo de processamento, ou seja, maior LT, salvo atendidos demais tempos antes do início das atividades críticas.

### 4.1. Avaliando-se o aumento do número de trabalhadores no cenário atual

Para o cenário atual o lote é de 20 peças com único trabalhador. Incrementando o número de trabalhadores de 2 até 12 avaliou-se o resultado de cada simulação. Espera-se um aumento na PD e redução do *lead-time* médio de produção. Aumentando-se o número dos trabalhadores até a capacidade máxima dos postos de trabalho, para o lote de 20 peças, obteve-se 195% de aumento efetivo da PD aumentando-se de 1 para 10 trabalhadores. Os resultados das simulações em 12 cenários diferentes estão apresentados na Figura 3 logo abaixo.

Figura 3 – LT x Custo x Produção x Trabalhador para lotes de 20 peças.



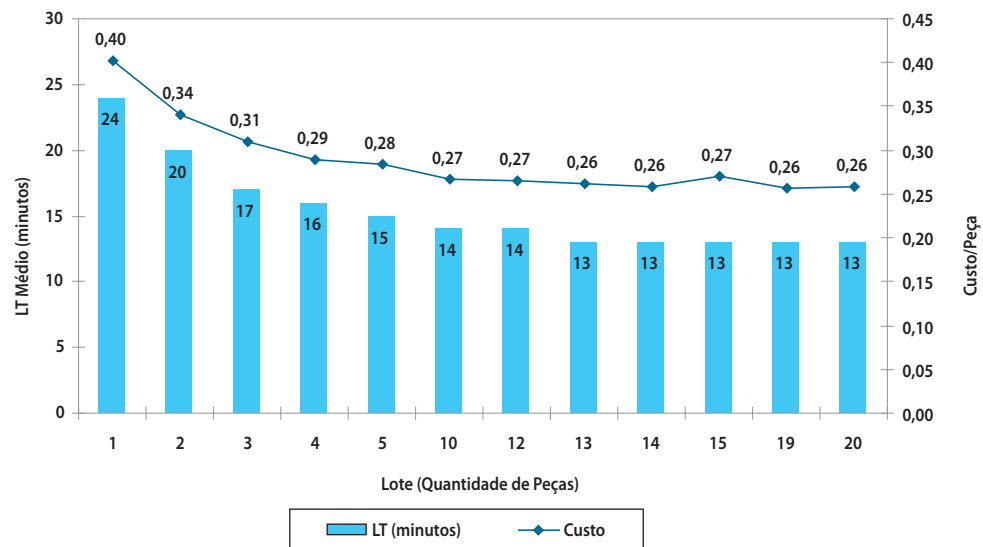
Fonte: Autor.

Sabe-se que a capacidade máxima é de 12 trabalhadores. Em contrapartida, a simulação indicou que a partir de 10 trabalhadores a PD não se altera e ocorrerão aumentos significativos do custo operacional pelo acréscimo. Quanto maior o número de trabalhadores com mesmo LT, maiores são os custos; isto porque o aumento de trabalhadores no sistema não representa aumento significativo da PD que justifique o custo envolvido nestes na produção.

## 4.2. Análise dos custos com diferentes tamanhos de lotes

Esta análise verificou qual deve ser o tamanho do lote ideal de forma a se obter o menor *lead-time* de produção médio com único trabalhador variando o tamanho do lote de 1 até 20 peças. Os resultados das simulações, adaptados dos resultados das simulações de 1 a 20 peças, estão apresentados na Figura 4 logo abaixo.

Figura 4 – LT x Custo x Produção x Lote para 1 trabalhador.



Fonte: Autor.

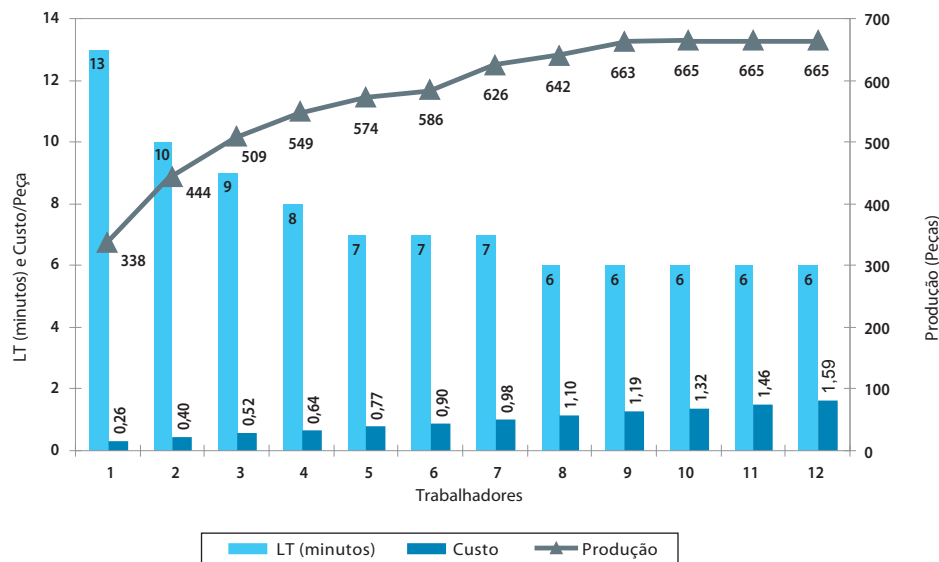
As simulações indicaram que o tamanho de lote de 13 peças com menor LT atende melhor o cenário para único trabalhador. A partir de lotes de 14 peças não nota-se diferença significativa no custo devido ao balanceamento não impactar nos custos para se produzir lotes de 13 ou 20 peças.

Por este motivo, foram simulados 12 cenários variando-se o número de trabalhadores com lote igual a 13 peças. Aumentando-se o número dos trabalhadores até a capacidade máxima dos postos de trabalho, para o lote de 13 peças, foi obtido 195% de aumento efetivo da PD aumentando-se de 1 para 10 trabalhadores.

Sabe-se que a capacidade máxima é de 12 trabalhadores, porém, a partir de 8 trabalhadores não se tem melhorias significativas no LT. A simulação indicou que a partir de 10 trabalhadores a PD não se altera, proporcionando resultados semelhantes ao cenário de 20 peças com mesmo número de trabalhadores.

Em comparação com o cenário de lotes com 20 peças (Figura 3), a simulação para lotes de 13 peças (Figura 5), indicou uma redução pouco significativa da PD, se comparados com a mesma quantidade de trabalhadores. Em relação ao lote de 20 peças, a de 13 peças apresentou menor PD. Os resultados das simulações em 12 cenários diferentes com lote de 13 peças estão apresentados na Figura 5 logo abaixo.

Figura 5 – LT x Custo x Produção x Trabalhadores para lotes de 13 peças.



Fonte: Autor.

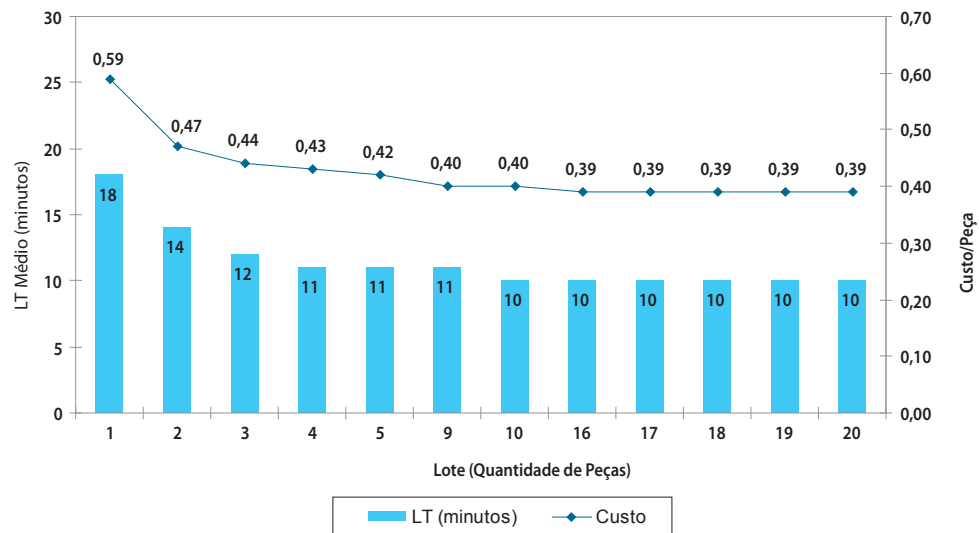
### 4.3. Análise dos custos do tamanho do lote com acréscimo de 1 trabalhador

Para atender a demanda futura é necessário ajustar a PD para 44 peças por dia. Aumentando-se de 1 para 2 o número de trabalhadores na linha de montagem espera-se que o LT seja reduzido e a PD futura alcançada. Para isto, repetiu-se os experimentos considerando-se 2 trabalhadores.

A simulação indicou que para 2 trabalhadores a PD não se altera em relação ao cenário base e fica mantido o custo operacional. Ocorreu que o aumento de 1 trabalhador no sistema não representa perda significativa da PD que justifique o custo de aumentar.

Em comparação com a simulação para lotes de 10 e 13 peças com 2 trabalhadores foi indicada uma redução pouco significativa da PD. Em relação ao lote de 10 peças a de 13 peças apresentou 2 peças a mais na PD. A análise verificou qual deve ser o tamanho do lote ideal de forma a se obter o menor *lead-time* de produção médio com 2 trabalhadores variando o tamanho do lote de 1 até 20 peças. As simulações indicaram que o tamanho de lote de 10 peças com menor LT atende melhor o cenário para 2 trabalhadores. A partir de lotes de 11 peças não nota-se diferença significativa no custo devido ao balanceamento não impactar nos custos para se produzir lotes de 11 ou 20 peças. Os resultados das simulações com 2 trabalhadores, adaptados dos resultados das simulações de 1 a 20 peças, estão apresentados na Figura 6 logo abaixo.

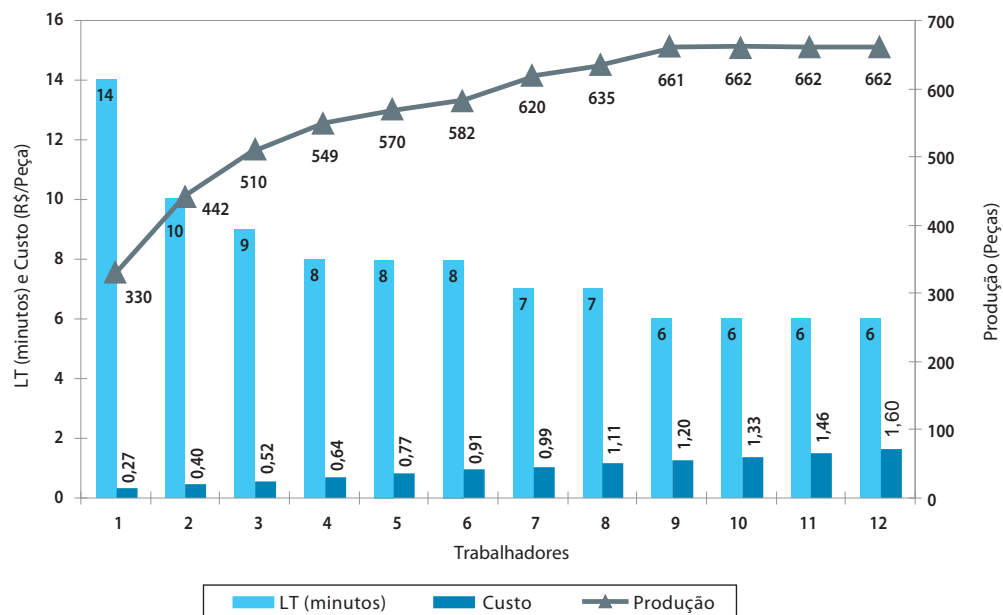
Figura 6 – LT x Custo x Produção x Lote para 2 trabalhadores na linha.



Fonte: Autor.

Por este motivo, foram simulados 12 cenários variando-se o número de trabalhadores e lote igual a 10 peças. Os resultados das simulações em 12 cenários diferentes com lote de 10 peças estão apresentados na Figura 7 logo abaixo.

Figura 7 – LT x Custo x Produção x Trabalhadores para lotes de 10 peças.



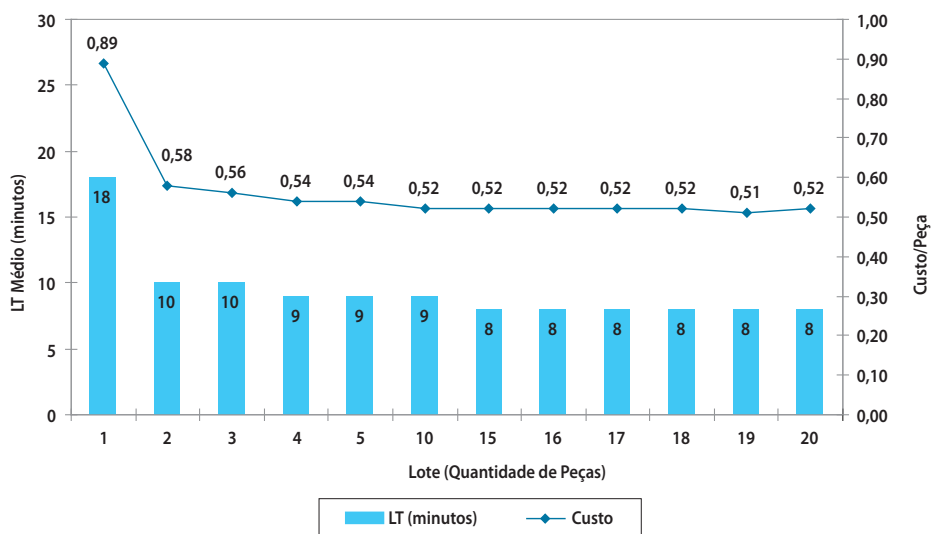
Fonte: Autor.

Aumentando-se o número dos trabalhadores até a capacidade máxima dos postos de trabalho para o lote de 10 peças, foi obtida uma redução pouco significativa da PD, menor que 2 %, quando aumentado de 1 para 2 trabalhadores.

#### 4.4. Análise dos custos do tamanho do lote com acréscimo de 2 trabalhadores

O tamanho ideal do lote será aquele que tiver o menor o LT e menor quantidade de peças possível. Neste caso, o menor lote é o de 10 peças com LT de 9 minutos. Os resultados das simulações com 3 trabalhadores na linha apresentaram os resultados da Figura 8 logo abaixo.

Figura 8 – LT x Custo x Produção x Lote para 3 trabalhadores.



Fonte: Autor.

A simulação com 3 trabalhadores indicou lotes de 10 peças com LT de 9 minutos. A PD não se altera em relação ao cenário com 2 trabalhadores e fica mantido o custo operacional. O gráfico da simulação da variação de trabalhadores com lotes de 10 peças é o mesmo da Figura 7 do item 4.3.

### 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Utilizando a metodologia CPM em ambiente de simulação virtual devidamente validado foi possível avaliar diferentes cenários e propor as seguintes soluções para o sistema em estudo:

É possível planejar a capacidade ajustando-se o tamanho do lote e a quantidade de trabalhadores para atender a variações sazonais da demanda ou até mesmo para futuras expansões da capacidade sem a necessidade imediata de investimentos em novos equipamentos;

- a) Com dois trabalhadores e lotes de 10 peças é atendida a demanda futura com PD de até 44 peças;
- b) Com único trabalhador e lotes de 13 peças o LT médio é de 13 minutos. Tem-se a redução de 35% de peças em processo favorecendo o nivelamento da produção alcançando uma PD de 38 peças;
- c) Com dois trabalhadores e lotes de 10 peças o LT médio é de 10 minutos. Tem-se a redução de 50% de peças em processo favorecendo o nivelamento da produção alcançando uma PD de 44 peças;
- d) Com três trabalhadores e lotes de 10 peças o LT médio é de 9 minutos. Tem-se a redução de 50% de peças em processo favorecendo o nivelamento da produção alcançando uma PD de 51 peças;
- e) Com acréscimo de até três trabalhadores o LT médio de 13 foi reduzido para 9 minutos com redução de 50% do tamanho do lote e aumento efetivo de 155% na PD.

Como sugestões para trabalhos futuros, outros projetos de pesquisa podem utilizar o Método do Caminho Crítico juntamente com a simulação para avaliar alterações na capacidade instalada e futura. Realizar diversas outras análises, por exemplo, de viabilidade para investimento em troca rápida de dispositivos de *setup*, aumento na quantidade de dispositivos de teste automático, etc.

## REFERÊNCIAS

- BANKS, J.; CARSEN, J. S. **Discret Event System Simulation**, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1984.
- CORRÊA, H. L.; GIANESI, I. G. N.; CAON, M. **Planejamento, Programação e Controle da Produção MRP II/ERP: Conceitos, Uso e Implantação**, Editora Atlas, 4ª Edição, 2001.
- CUSUMANO, M. A. **The Japanese Automobile Industry**. Cambridge: The Council on East Asian Studies, Harvard University, p.262-319, 1989.
- HAY, E. J. **The Just-in-Time Breakthrough: Implementing the New Manufacturing Basics**, John Wiley and Sons, Inc, USA, 1988.
- HOLLOCKS, B. **A Well-Kept Secret: Simulation in manufacturing industry review**. OR Insight 5(4) 12-17. 1992.
- LEAL, L. R.; OLIVEIRA, M. J. F. Simulação aplicada ao gerenciamento de projetos: uma revisão. **Revista Produção Online**, Florianópolis, mai. de 2011. ISSN 16761901. Disponível em: <http://producaoonline.org.br/rpo/article/download/737/795>. Acesso em: 07/03/2012
- LIKER, J. K. **O Modelo Toyota: 14 princípios de gestão do maior fabricante do mundo**. Trad. Lene Belon Ribeiro. Porto Alegre: Bookman, 2005. 316 p.
- LOBÃO, E. C.; PORTO, A. J. V. **Proposta Para Sistematização de Estudo de Simulação**. Escola de Engenharia de São Carlos – EESC/USP; São Paulo; 1996.
- MIRANDA, C. M. G.; FERREIRA, R. J. P.; GUSMÃO, A. P. H.; ALMEIDA, A. T. Sistema de apoio a decisão para seleção de atividades críticas no gerenciamento de projetos com avaliação multicritério. **Revista Produção Online**, Florianópolis, mar. 2010. ISSN 16761901. Disponível em: <http://producaoonline.org.br/rpo/article/download/575/621>. Acesso em: 07/03/2012.

MISHRA, S. K.; MANORIA, A. Assembly Line Balancing by RPW Method in Language C++. **International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development** (IJMPERD), mar. de 2012. ISSN 22496890. Disponível em: <http://www.tjprc.org/download.php?fname=tjprcfile334.pdf>. Acesso em: 14/07/2012

MOURA, R. A. **Kanban: A simplicidade do controle da produção**. São Paulo: Instituto de Movimentação e Armazenagens de Materiais, IMAM, 1989. 355 p. (Série qualidade e produtividade do IMAM).

PEDGEN, C. D.; SHANON, R. E.; SADOWSKY, R. **Introduction to Simulation Using SIMAN**, McGraw-Hill New Jersey, 1990.

PRADO, D. S. **Usando o Arena em Simulação**. Belo Horizonte – MG; Editora de Desenvolvimento Gerencial; 2008.

Schriber, T.J. **Simulation Using GPSS**. Wiley, NY, 1974.

SHANNON, R.E. **Systems Simulation: The Art Science**. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 1975.

SHIGEO, S. **Sistemas de Produção com Estoque Zero: O Sistema Shingo para melhorias contínuas**. Porto Alegre: Bookman, 1996. 380 p.

SLACK, N.; CHAMBERS, S.; JOHNSTON, R. **Administração da Produção**. São Paulo: Atlas, 2010.

SMALLEY, A. **Conectando a Montagem aos Processos em Lotes através de Sistemas Puxados Básicos**. 2006. Disponível em: [http://www.lean.org.br/comunidade/artigos/pdf/artigo\\_105.pdf](http://www.lean.org.br/comunidade/artigos/pdf/artigo_105.pdf). Acesso em: 25/07/2010

SMALLEY, A. Apêndice do “**Criando o Sistema Puxado Nivelado**” Pontos adicionais para a produção de baixo volume e alta variedade. 2007. Disponível em: [http://www.lean.org.br/comunidade/artigos/pdf/artigo\\_81.pdf](http://www.lean.org.br/comunidade/artigos/pdf/artigo_81.pdf). Acesso em: 25/07/2010

WEAVER, P. **A Brief History of Scheduling**. Hyatt, Canberra. 2006. Disponível em: [http://www.mosaicprojects.com.au/PDF\\_Papers/P042\\_History%20of%20Scheduling.pdf](http://www.mosaicprojects.com.au/PDF_Papers/P042_History%20of%20Scheduling.pdf). Acesso em: 12/07/2012

WEAVER, P. **Why Critical Path Scheduling is Wildly Optimistic!** (Or why so many projects finish late). Fairmont, San Francisco. 2011. Disponível em: [http://www.mosaicprojects.com.au/PDF\\_Papers/P117\\_Why\\_Critical\\_Path\\_Scheduling\\_is\\_Wildly\\_Optimistic.pdf](http://www.mosaicprojects.com.au/PDF_Papers/P117_Why_Critical_Path_Scheduling_is_Wildly_Optimistic.pdf). Acesso em: 25/07/2010.



## ANEXO 1

Quadro 2 – Dependências e tempos das atividades da linha de montagem de bomba profissional.

Tarefa	Atividade	Dependente de	Tempo (s)	Posto de trabalho
A	Troca do dispositivo	–	202	Prensa
B	Montar anéis no cabeçote baixa pressão na prensa	A	92	Prensa
C	Troca do dispositivo	B	244	Prensa
D	Montar anéis no cabeçote alta pressão na prensa	C	26	Prensa
E	Montar válvulas no cabeçote	–	26	Posto 2
F	Montar o'ring na tampa de fixação da válvula	–	70	Posto 2
G	Parafusar tampa de fixação da válvula	E,F	27	Posto 2
H	Parafusar bujão no cabeçote	–	25	Posto 8
I	Disponibilizar cabeçote para montagem no bloco	G,D	6	Posto 8
J	Montar pistão, pino e biela na prensa	–	36	Posto 3
K	Montar retentores no bloco	–	16	Posto 4
L	Montar pistões com 1 virabrequim	K,J	20	Posto 5
M	Montar rolamento no bloco	L	37	Posto 5
N	Montar visor de óleo no bloco	M	10	Posto 5
O	Montar tampa do bloco com o'ring e parafusar	N	28	Posto 6
P	Montar tampa do mancal na prensa	–	12	Posto 7
Q	Parafusar tampa do mancal no bloco	P	18	Posto 6
R	Montar anel e parafusar pistões cerâmicos.	Q,O	57	Posto 8
S	Parafusar o bloco + cabeçote	I,R	57	Posto 8
T	Montar na bancada de teste e abastecer óleo	S,H	70	Teste automático
U	Teste automático	T	320	Teste automático
V	Retirar do teste e preencher ficha c/ parâmetros	U	45	Teste automático

