



Production

ISSN: 0103-6513

production@editoracubo.com.br

Associação Brasileira de Engenharia de

Produção

Brasil

Fernandes, Laerte José; Osés Rodriguez, Luis Alberto; Ribeiro Correia, Anderson; Silva Marins, Fernando Augusto

Planejamento e controle da produção de cilindros para laminação: um estudo de caso quantitativo

Production, vol. 23, núm. 1, enero-marzo, 2013, pp. 120-135

Associação Brasileira de Engenharia de Produção

São Paulo, Brasil

Disponível em: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=396742051009>

- ▶ [Como citar este artigo](#)
- ▶ [Número completo](#)
- ▶ [Mais artigos](#)
- ▶ [Home da revista no Redalyc](#)

# Planejamento e controle da produção de cilindros para laminação: um estudo de caso quantitativo

Laerte José Fernandes<sup>a</sup>, Luis Alberto Osés Rodriguez<sup>b</sup>,  
Anderson Ribeiro Correia<sup>c</sup>, Fernando Augusto Silva Marins<sup>d\*</sup>

<sup>a</sup>laerte.fernandes@villaresrolls.com, Villares Rolls, Brasil

<sup>b</sup>osesrodriguez@yahoo.com.br, Villares Rolls, Brasil

<sup>c</sup>correia@ita.br, ITA/CTA, Brasil

<sup>d</sup>\*fmarins@feg.unesp.br, UNESP, Brasil

## Resumo

Este trabalho apresenta um modelo de otimização-simulação aplicado em um estudo de caso real no setor de cilindros para laminação de uma siderúrgica, buscando melhorar o gerenciamento da área/equipamento gargalo da linha de produção. A simulação atuou em conjunto com um modelo de otimização da programação linear inteira (PLI) para melhorar o atendimento de prazo junto aos clientes em uma produção não seriada. Como resultado deste procedimento combinado da PLI e simulação, o processo produtivo foi otimizado e as filas de espera e o *lead-time* foram reduzidos, melhorando o atendimento aos clientes.

## Palavras-chave

Programação linear inteira. Método simulação-otimização. Cilindros de laminação. Produção não seriada.

## 1. Introdução

O cenário atual de intensa competitividade entre as cadeias de suprimento ultrapassa a competição pura e simples entre as empresas, levando-as a reexaminar suas estratégias de gerenciamento de materiais, sistemas e métodos de produção.

Oliveira, Duarte e Montevechi (2002) afirmam que a produção tem o desafio de desenvolver novas metodologias ou adotar sistemas de gestão que possibilitem a sobrevivência da empresa no mercado. Tais sistemas exigem uma reestruturação organizacional que permita alcançar os objetivos propostos.

Ao longo das últimas décadas, percebe-se o estreitamento do relacionamento entre a média e a alta gerência, embora a busca pela integração entre estratégia e manufatura ainda esteja presente e válida.

Papadopoulos, Heavey e Browne (1993) comentam que uma empresa de manufatura costuma lidar com problemas de tomada de decisão no âmbito estratégico, tático e operacional. No nível estratégico estão as decisões relacionadas à missão da empresa e a seus objetivos de longo prazo, tais como: localização

de plantas industriais, aquisição de novos recursos e introdução de novas tecnologias e produtos. As decisões de nível tático situam-se em um horizonte de planejamento mais estreito, que varia de semanas a meses, e servem, geralmente, de *input* para as decisões de longo prazo. Essas decisões estão relacionadas ao tipo de sistema de fabricação (produção em massa ou em lotes), ao modelo de produto a ser fabricado e ao volume a ser produzido. Finalmente, as decisões de nível operacional, tomadas no ambiente do chão de fábrica, são aquelas de curto prazo, podendo variar de horas até dias e, geralmente, estão relacionadas à alocação dos recursos recuperáveis (máquinas) para a transformação dos recursos irrecuperáveis (matérias-primas e componentes) em produtos acabados.

O propósito do presente trabalho foi elaborar um modelo de planejamento e gestão da produção, utilizando a técnica de programação linear inteira (PLI), e avaliar, por meio de um modelo de simulação, as interferências que possam ocorrer durante o processo

\*UNESP, Guaratinguetá, SP, Brasil

Recebido 25/03/2010; Aceito 10/10/2011

de fabricação de um cilindro de laminação. Além disso, por meio da simulação, objetivou-se otimizar a gestão do equipamento gargalo de forma a estabelecer prioridades de usinagem e transformar o processo num fluxo contínuo, sem desabastecimento das linhas.

## 2. Modelagem

A pesquisa operacional (PO) é um método científico de trabalho que auxilia o processo de decisão e visa obter o melhor rendimento possível no funcionamento de uma organização ou sistema em estudo. Para isso, utiliza técnicas e instrumentos científicos, baseando-se em análises quantitativas, e seu objetivo é descobrir regularidade em algum fenômeno e correlacionar essa regularidade a outros conhecimentos, de tal forma que o fenômeno possa ser modificado ou controlado (HILLIER; LIEBERMAN, 2006; LACHTERMACHER, 2004; ARENALES et al., 2007). A modelagem aqui descrita utiliza a programação linear inteira e a simulação de sistemas.

### 2.1. Simulação-otimização

Desde a metade do século passado, analistas da PO vêm desenvolvendo um grande conjunto de técnicas e conhecimentos para solucionar os problemas que aparecem em muitos sistemas complexos (GRANGER; KRISHNAMURTHY; ROBINSON, 2002).

Entretanto, a complexidade dos sistemas atuais impede que aproximações analíticas tradicionais isoladas levem a soluções completamente satisfatórias (KÖCHEL; KUNZE; NIELÄNDER, 2003). Nesse ambiente surgiu a simulação-otimização (Figura 1), que integra um simulador de sistema real a métodos de otimização satisfatórios para um determinado problema, associando os objetivos da otimização às vantagens da simulação (CECILIANO, 2007; PINTO JUNIOR, 2001).

Azadivar (1999) definiu um problema de simulação-otimização como um problema de otimização em que a função-objetivo e/ou algumas restrições são avaliadas por meio da simulação computacional.

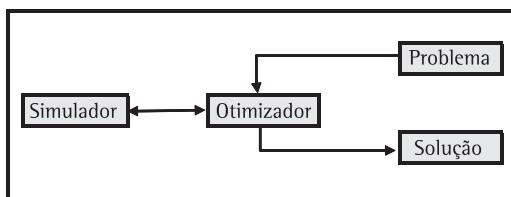


Figura 1. Princípio da simulação-otimização. Fonte: Köchel, Kunze e Nieländer, (2003).

O desenvolvimento de métodos de simulação-otimização é, atualmente, um campo ativo de pesquisa. Além disso, a elaboração de modelos que utilizam os conceitos de simulação e otimização simultaneamente tem se tornado cada vez mais frequente (CECILIANO, 2007; PINTO JUNIOR, 2001).

A simulação, geralmente, tem como foco a estimativa de desempenho, enquanto a análise matemática sempre envolve o cálculo analítico do desempenho do sistema (CARDOSO; VINHOZA; SAMPAIO NETO, 2007).

Morito et al. (1999) afirmam que as forças e fraquezas da programação matemática (PM) e da simulação são complementares. Enquanto a PM é fraca em pontos como desconhecimento da relação de entrada/saída, dinamismo do sistema, não linearidade, ausência de aleatoriedade e detalhes dos sistemas, a simulação é fraca em sua capacidade de otimização (MORITO et al., 1999; CECILIANO, 2007).

Embora alguns problemas importantes sejam de natureza da otimização, sua aplicação para problemas complexos pode conduzir a dificuldades de interpretação dos resultados. Uma vez que em certas situações não é possível incluir todas as restrições e procedimentos operacionais de um sistema real em um modelo de otimização, a simulação pode ser uma ferramenta útil para incorporar todos estes aspectos (CECILIANO, 2007).

Já para utilizar-se a simulação na avaliação e na melhoria do desempenho de um processo é necessário construir cenários, executá-la para cada cenário e, em seguida, analisar os resultados. Isso, apesar da capacidade de gerar bons resultados, pode se tornar muito cansativo e consumir muito tempo; além de não garantir que as melhores configurações sejam experimentadas (PINHO, 2008).

O intuito de associar as técnicas de otimização e simulação é justamente resolver tais problemas. Uma característica comum aos métodos de simulação-otimização é a representação dos parâmetros de decisão do sistema por meio de funções implícitas, e a natureza estocástica da função-objetivo e/ou das restrições do problema, que podem ser avaliadas por meio de simulação (AZADIVAR, 1999).

Outra característica comum aos métodos de simulação-otimização convencionais é a simulação repetitiva do sistema: a cada passo de melhoria, o desempenho do sistema é avaliado, ao menos uma vez, pela simulação (GRANGER; KRISHNAMURTHY; ROBINSON, 2002). O analista simula um sistema específico e determina o valor ótimo para algum parâmetro dentro do problema, mediante a aplicação de uma técnica de otimização. A seguir, o analista aplica a simulação aos resultados do problema de

otimização para conferir a validade dos mesmos, utilizando os resultados do modelo de otimização como *inputs* para o modelo de simulação. Caso a solução não seja considerada satisfatória, a otimização deverá gerar, baseada nos resultados da etapa anterior, uma nova solução, que deverá ser testada novamente pela simulação. Esse ciclo é repetido até que algum critério de parada seja satisfeito (FU, 2002; BUSH; BILES; DEPUY, 2003).

De acordo com Azadivar (1999), as principais vantagens da simulação-otimização, são:

- A complexidade do sistema modelado não afeta significativamente o desempenho do processo de otimização;
- Para sistemas estocásticos, a variabilidade da resposta pode ser controlada por meio de várias técnicas de análise de dados de saída;
- O modelo de simulação permite a inclusão de detalhes (procedimentos operacionais e restrições complexas) que não podem ser considerados num modelo de otimização convencional (BUSH; BILES; DEPUY, 2003);
- A presença da simulação fornece uma vantagem que não é frequentemente possível em procedimentos clássicos de otimização: mediante o emprego de técnicas apropriadas, a função-objetivo e/ou as restrições podem ser modificadas de uma interação para outra para refletir as possíveis alternativas do sistema em estudo; e
- Os resultados oriundos do modelo de otimização podem ser validados por um modelo de simulação. Nesse caso, como os resultados e parâmetros do modelo de otimização serão usados como entradas do modelo de simulação, é possível comparar os resultados da simulação com soluções consideradas aceitáveis para o sistema real, permitindo ao analista modificar o modelo de otimização se tais resultados não forem aceitáveis. Dessa forma, a técnica de simulação-otimização garante que as soluções encontradas sejam viáveis para o sistema real e não apenas para o modelo de otimização (BUSH; BILES; DEPUY, 2003).

Azadivar (1999) relata, ainda, que as principais desvantagens da simulação-otimização são:

- Não há uma expressão analítica da função-objetivo ou das restrições, o que elimina a possibilidade de diferenciação ou cálculo exato de gradientes locais;
- A função-objetivo e as restrições são funções estocásticas de variáveis de decisão determinísticas. Isso representa um grande problema até mesmo na estimativa de derivadas locais aproximadas. Além disso, causa problemas até mesmo usando enumeração completa, uma vez que, baseada em uma só observação de cada ponto, não se pode determinar o melhor ponto de decisão;

- A simulação computacional é muito mais custosa do que a avaliação de funções analíticas. Isso torna crítica a eficiência dos algoritmos de otimização; e
- As linguagens de simulação são bastante diferentes das linguagens de otimização. Fazer a interface dos modelos de simulação com modelos genéricos de otimização nem sempre é uma tarefa fácil, especialmente quando se trata das modernas linguagens de simulação de alto nível.

### 3. Método de pesquisa

A Figura 2 exibe o fluxograma com o método utilizado para desenvolver este trabalho.

O mapeamento de processos facilitou a visualização e compreensão das atividades executadas no processo e suas interrelações. Já a identificação do gargalo

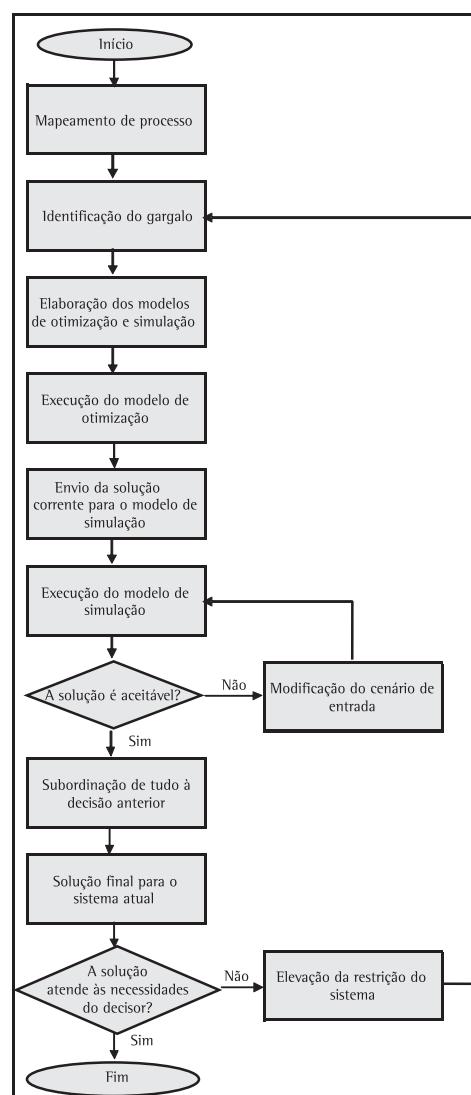


Figura 2. Etapas do método de pesquisa.

direcionou e concentrou os esforços nos pontos cruciais do sistema analisado. O modelo de PLI adotado, e resolvido pelo Solver®, considerou apenas fatores essenciais do problema, enquanto os detalhes foram incluídos no modelo de simulação. A validação do modelo matemático foi realizada por avaliação dos resultados obtidos com o modelo e por comparação destes resultados com os resultados obtidos no sistema real.

Com respeito ao modelo de simulação desenvolvido, foi utilizado um procedimento adaptado daqueles propostos por Bateman e Bowden (2002), Chwif e Medina (2006) e Fernandes (2008), conforme Figura 3 e descrito a seguir.

**Definição do problema e dos objetivos:** Um sistema pressupõe uma interação de causa-efeito entre os elementos que o compõem. Para que tais elementos e para que as interações entre eles possam ser identificados, o objetivo do sistema deve ser estabelecido com clareza (CHWIF; MEDINA, 2006).

Uma vez entendido o processo, é necessário definir claramente o problema, as perguntas a serem respondidas, as hipóteses a serem testadas e os efeitos a serem estimados, garantindo que o problema esteja completamente entendido e que exista uma solução técnica para resolvê-lo (CHWIF; MEDINA, 2006).

Os objetivos de um estudo de simulação fluirão naturalmente a partir da definição do problema, uma vez que o propósito da experimentação é resolver esse problema (BATEMAN; BOWDEN, 2002).

**Formulação e planejamento do modelo:** Uma vez determinados o problema e os objetivos da simulação, definem-se os cenários alternativos que serão considerados, como cada cenário será avaliado e os dados necessários. Deve-se, também, especificar a abrangência do modelo, os recursos necessários (orçamento, equipamentos etc.) e o cronograma de atividades (PEIXOTO, 2006). Além disso, o analista poderá desenvolver, nessa etapa, uma estrutura conceitual para o modelo, que deverá incluir, via de regra, eventos e elementos fundamentais (BATEMAN; BOWDEN, 2002).

Assim, é necessário identificar e incluir apenas aqueles fatores que apresentem impacto significativo no comportamento do modelo, que devem estar em conformidade com o propósito da simulação (BATEMAN; BOWDEN, 2002).

**Coleta e tratamento de dados:** A coleta se refere a dados quantitativos e qualitativos sobre as entradas e saídas do sistema, assim como a informações sobre seus componentes e relações (GAVIRA, 2003).

Dessa forma, a etapa da coleta de dados tem início com a escolha adequada das variáveis de entrada do sistema a ser simulado, cabendo ao analista definir os dados necessários (GAVIRA, 2003; CHWIF; MEDINA, 2006). A ênfase inicial deve ser a coleta de fatos fundamentais, informações e estatísticas que algumas vezes se referem a dados de âmbito global. Isso vai permitir ao analista solicitar informações mais detalhadas de outros participantes, reunindo dados que serão necessários em estágios posteriores

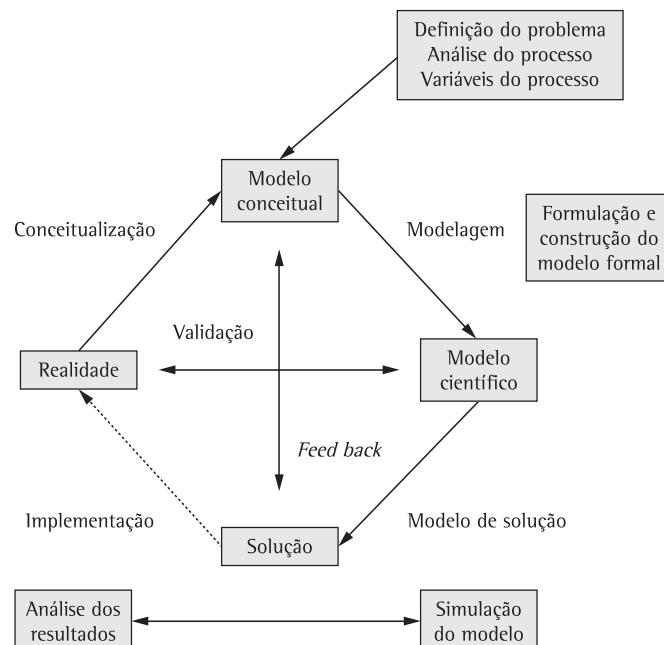


Figura 3. Desenvolvimento de um modelo de simulação. Fonte: Fernandes (2008).

do projeto (BATEMAN; BOWDEN, 2002; CHWIF; MEDINA, 2006).

Os dados utilizados neste trabalho estavam disponíveis no sistema da empresa – ERP (Enterprise Resource Planning) e que eram mantidos atualizados pelos setores de engenharia de processo e de produto.

**Desenvolvimento do modelo:** Todos os modelos de simulação são desenvolvidos para representar algum tipo de sistema. Basicamente, os componentes de um sistema são as entidades dinâmicas, os recursos e as filas (PAIVA, 2005; PEIXOTO, 2006).

Entidades dinâmicas são os objetos que se movem através do sistema e que necessitam dos serviços e/ou processamento de alguns dos recursos do sistema. Entidades têm atributos que descrevem suas características e passam por eventos, que são ocorrências instantâneas que podem alterar o estado do sistema ou de seus atributos.

Recursos são as entidades estáticas que promovem o serviço ou processam uma entidade, podendo ser máquinas, pessoas, correias transportadoras etc. Os recursos estão relacionados a atividades que demandam um período de tempo especificado.

As filas, por sua vez, constituem locais de espera onde as entidades dinâmicas aguardam a sua vez de seguir através do sistema.

De acordo com Cardoso, Vinhoza e Sampaio Neto (2007), um modelo de simulação nada mais é do que um diagrama em blocos que descreve a interconexão dos vários subsistemas componentes, sendo, cada bloco, constituído por uma expressão matemática, ou conjunto de equações que definem o relacionamento entre entrada e saída.

Para Balci (1997), o modelo conceitual pode ser utilizado como uma ferramenta de controle do processo de modelagem e simulação, podendo auxiliar na avaliação de conceitos, eficácia e erros, além de servir como base para o projeto de modelagem e simulação, e de auxiliar no processo de verificação e validação do modelo computacional.

Criar um modelo formal ou conceitual nada mais é do que representar um sistema real num diagrama de fluxo lógico. O diagrama representará o problema por meio de associações feitas entre as entidades e as atividades.

**Verificação:** A etapa de verificação está relacionada ao modo como o modelo está sendo implementado e consiste na eliminação dos erros do modelo computacional (CHWIF; MEDINA, 2006).

Um modelo estará pronto para ser verificado quando funcionar da maneira como o analista pretendia. Para a verificação do modelo aqui apresentado, foram utilizadas as animações, os

contadores e o depurador que acompanham o *software* onde o modelo foi implementado.

**Validação:** Está ligada ao modelo conceitual e relacionada ao que foi modelado (CHWIF; MEDINA, 2006). A validação é o processo de assegurar que o modelo criado reflete com fidelidade a operação do sistema real em estudo (respeitando-se um intervalo de aceitação para as variáveis analisadas), de tal forma que dê encaminhamento ao problema definido (CHWIF; MEDINA, 2006; MONTEVECHI et al., 2002).

Uma técnica utilizada para validar um modelo de simulação consiste em escolher uma pessoa que entenda bem do sistema (especialista) que foi simulado e apresentar a ela dois conjuntos de dados de saída, um proveniente do sistema real e outro do modelo de simulação. Se o especialista não conseguir distinguir se os resultados são oriundos do sistema real ou do modelo de simulação, então o modelo é considerado “válido”.

Outro método empregado para testar um modelo consiste em realizar alterações nos dados de entrada e verificar se o mesmo responde às mudanças da mesma forma que o sistema real. Alterando o valor de um parâmetro de entrada e comparando o impacto com as respostas conhecidas do sistema, é possível estabelecer a credibilidade de um modelo. Os resultados desse tipo de teste servirão também como análise de sensibilidade para identificar os tipos de informação que merecem esforço adicional de conjunção de dados.

Ainda, outra forma de validação estabelece o uso de dados de entrada históricos para alimentar o modelo. As saídas do modelo devem ser então comparadas com as saídas históricas para se determinar se o modelo consegue reproduzir satisfatoriamente o comportamento do sistema real (BATEMAN; BOWDEN, 2002; CHWIF; MEDINA, 2006).

Embora para efeito didático a validação e a verificação do modelo tenham sido apresentadas neste trabalho após a construção do modelo computacional, essas devem acompanhar todas as etapas do projeto na forma de um processo contínuo.

O modelo criado neste trabalho foi validado por meio da utilização de dados históricos e da comparação das saídas do modelo com resultados reais.

**Experimentação:** Consiste no desenvolvimento de procedimentos e testes para analisar e comparar alternativas, maximizando a utilidade da informação produzida pela execução da simulação (BATEMAN; BOWDEN, 2002).

O ideal é que o analista e demais envolvidos no projeto tenham ideias preliminares sobre as alternativas de solução a avaliar.

Uma das preocupações do analista nesta etapa do processo é determinar o momento em que o

modelo passa a atuar em regime permanente, pois durante o regime transitório o desempenho do sistema relaciona-se fortemente as suas condições iniciais. Dessa forma, o regime transitório, além de ser mais complexo e pouco conclusivo, pode afetar perigosamente os resultados de uma simulação, uma vez que as condições iniciais do sistema nem sempre são as mesmas (CHWIF; MEDINA, 2006).

Diversas simulações compostas de  $n$  replicações para valores diferentes de *warm-up* devem ser feitas para determinar o período de aquecimento. O comportamento da variável de resposta é monitorado ao longo das simulações. Quando essa variável se estabiliza em torno de um determinado valor, o período de aquecimento é obtido com o acréscimo de um fator de segurança de 20% a 30% em relação ao valor em que teve início a estabilização da variável de resposta, conforme Chwif e Medina (2006).

O analista irá, então, considerar a variação dos resultados de saída e determinar o número de replicações necessárias para obter uma amostragem estatística confiável (BATEMAN; BOWDEN, 2002).

O intervalo de confiança (COSTA NETO, 2002) para a média da variável do sistema, para desvio padrão conhecido, é dado pela Equação 1:

$$P\left[\bar{\bar{X}}\left(1 - \frac{r}{100}\right) \leq \bar{\mu} \leq \bar{\bar{X}}\left(1 + \frac{r}{100}\right)\right] = 1 - \alpha \quad (1)$$

onde,  $\bar{\bar{X}}$  é o valor inicialmente estimado para a média amostral  $\bar{X}$ ;  $r$  é a precisão desejada (em %);  $\sigma$  é o desvio padrão (conhecido);  $n$  é o tamanho da amostra de resultados da variável de interesse, dado

$$\text{por } n = \left( \frac{100 \cdot Z_{\alpha/2} \cdot \sigma}{r \cdot \bar{X}} \right)^2; \text{ } \alpha \text{ é o nível de confiança e } Z \text{ é}$$

uma variável aleatória com distribuição Normal (0,1).

No caso de desvio padrão desconhecido, tem-se a Equação 2, onde se utiliza o desvio padrão amostral ( $s$ ) e substitui-se a distribuição Normal pela distribuição t-Student:

$$n = \left( \frac{100 \cdot t_{n-1, \alpha/2} \cdot s}{r \cdot \bar{X}} \right)^2 \quad (2)$$

Utiliza-se a Equação 2 para determinar o número de replicações. Para isso, é necessário estimar, inicialmente, um valor para a média amostral e definir a precisão e a confiança estatística desejadas, obtendo-se, então, um primeiro valor para  $n$ . A seguir, realiza-se uma simulação com o número de replicações encontrado. Calcula-se, então, o valor médio da variável resposta fornecido pelo modelo computacional e compara-se esse valor com o valor

estimado anteriormente. Se o valor encontrado com a simulação for maior ou igual ao que foi admitido anteriormente, o valor de  $n$  obtido na Equação 2 será o número de replicações a ser utilizado no modelo computacional. Caso contrário, deve-se recalcular o valor de  $n$ , utilizando-se a média da variável resposta obtida com a simulação como estimativa para o novo valor da média amostral e repetir o processo (COSTA NETO, 2002).

**Análise dos resultados e apresentação:** A fim de selecionar a alternativa testada que apresentou melhor desempenho, o analista deve realizar uma análise estatística dos resultados.

Cada configuração do modelo e seus respectivos resultados de saída devem ser documentados. Além de facilitar relatos eventuais, o armazenamento dos registros poderá auxiliar o modelador/analista a determinar a alternativa que atinge melhor resultado e permitirá a ele observar tendências que possam sugerir alternativas adicionais a considerar (BATEMAN; BOWDEN, 2002).

Para comprovar a melhoria no sistema real utilizando a simulação, deve-se realizar a comparação entre as médias antes e após a implementação do modelo, por meio do teste de hipótese. Aqui foi utilizado o método de Aspin-Welch (COSTA NETO, 2002) para comparar as duas médias. Esse método sugere tomar o  $t$  crítico com número de graus de liberdade dado pela Equação 3:

$$v = \frac{(w_1 + w_2)^2}{\frac{w_1^2}{(n_1 + 1)} + \frac{w_2^2}{(n_2 + 1)}} - 2 \quad (3)$$

$$\text{onde } w_1 = \frac{s_1^2}{n_1} \text{ e } w_2 = \frac{s_2^2}{n_2}$$

$$t_{\text{calculado}} = \frac{\left( \bar{X}_1 - \bar{X}_2 \right)}{\sqrt{\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}}}$$

**Implementação:** Esta etapa começa com o projeto de simulação e termina com os ajustes finais do modelo, a preparação e formação do pessoal que irá utilizá-lo no dia a dia e com a garantia da validade dos resultados (PAIVA, 2005).

O sucesso dessa etapa depende do bom desenvolvimento de todas as fases anteriores. Se todos aqueles que forem abrangidos pelo processo se mantiverem informados e envolvidos em todas as etapas, eles estarão muito mais dispostos a auxiliar na implementação da solução selecionada (BATEMAN; BOWDEN, 2002).

Como o modelo de PLI desenvolvido neste trabalho considera apenas fatores essenciais do sistema, ele

não é capaz, por si só, de avaliar as interferências que podem ocorrer durante o processo produtivo. Assim, a etapa seguinte do método proposto consiste em enviar os resultados obtidos no modelo de otimização para o modelo de simulação, uma vez que esse último contempla mais detalhes do sistema analisado.

Para isso, o analista deve determinar quais cenários deverão ser avaliados, para, a seguir, executar o modelo de simulação (com as devidas replicações) e complementar a solução obtida pelo modelo de otimização. Após a execução do modelo, o analista deve avaliar os resultados e decidir se a solução obtida é aceitável ou não.

Caso a solução não seja considerada aceitável, o analista deve escolher outro cenário e realizar uma nova simulação, até que uma solução satisfatória seja encontrada.

As necessidades das restrições é que determinarão o programa de produção das não restrições. Assim, depois de definir como explorar as restrições do sistema, os recursos não limitadores (não restrição) devem ser subordinados às restrições do sistema. Após a execução desse passo, chega-se à solução final para o atual sistema, que deve ser implantada na linha de produção.

#### 4. Estudo de caso

A empresa foco do estudo de caso é uma siderúrgica, situada em Pindamonhangaba, SP. É uma das três maiores produtoras de cilindros de laminação do mundo e tem como missão ser referência no mercado mundial. Sua carteira de clientes é formada por empresas siderúrgicas e sua produção atual é de, aproximadamente, 40.000 t/ano, das quais 80% são destinados ao mercado internacional.

Nos últimos anos, devido ao crescimento da produção no mercado externo, o atendimento ao prazo tornou-se um dos fatores preponderantes para o sucesso da empresa.

O acompanhamento do desempenho de embarque é realizado mensalmente conforme a Tabela 1. Com o aumento das exportações, percebeu-se a dificuldade de cumprimento do prazo interno de liberação do produto (data de liberação interna do produto é chamada de “data de remessa”), impedindo a exportação do produto na data acordada, e, por consequência, atraso na entrega do produto ao cliente final.

Para verificar o comportamento de acerto da data de remessa, foi realizado um levantamento comparando a data de remessa real e a data de remessa prevista (acerto). A Figura 4 mostra o acerto em relação à data de remessa prevista. Observa-se que o acerto

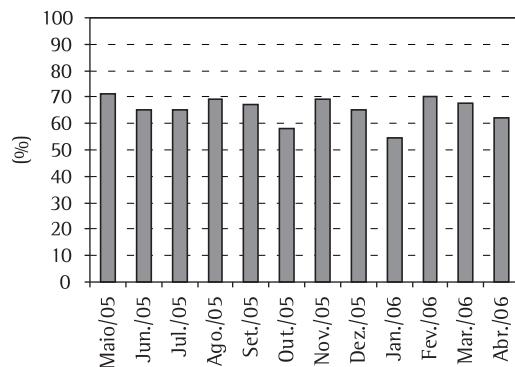


Figura 4. Acerto da data de remessa – previsto x real.

entre a data de remessa prevista e a real se mantinha entre 60% e 70%.

Esse levantamento mostrou problemas no atendimento da data de remessa prevista, gerando reprogramações de embarque que podem causar atrasos na entrega ao cliente. A fim de identificar o principal fator de influência nesse atraso, analisou-se a linha de processo da produção.

#### 4.1. Linha de produção

A Figura 5 expõe uma representação esquemática do processo de produção de um cilindro forjado.

O sistema de produção de cilindros de laminação de tiras a frio pode ser dividido basicamente em três setores: lingotamento, forjaria e usinagem e tratamento térmico (UTT).

Os cilindros são lingotados e enviados para a Forjaria, onde são prensados com a finalidade de obter-se produtos semiacabados; em seguida, os semiacabados são encaminhados para o setor de usinagem e tratamento térmico. No setor de lingotamento, o aço líquido proveniente da aciaria é transportado numa panela com capacidade máxima de 90 t de metal líquido. Entretanto, como há perdas metálicas no processo (exemplo: formação de escória, perdas nos canais que alimentam as lingoteiras etc.), a capacidade líquida que é disponibilizada para a produção é de 86 t de metal.

Após o lingotamento, aguarda-se a solidificação dos lingotes. Uma vez solidificados, os “cilindros” são retirados das lingoteiras e colocados num vagão, o qual os encaminhará para a Forjaria, onde serão colocados em fornos de aquecimento até passarem pela prensa. Depois do processo de forjamento, os cilindros são enviados para fornos de tratamento térmico antes de serem enviados para a UTT.

Depois de passar pela Forjaria, os cilindros são encaminhados para o setor de usinagem e tratamento

Tabela 1. Acompanhamento dos embarques.

OV	Cliente	Cil.	Liga	Peso	Prev. remessa	Rev. remessa	Prev. emb.	Rev. emb.	Efet. emb.	Porto	Navio
412165	A	56756	1	6360	27/10/06	30/10/06	05/11/06	13/11/06	13/11/06	Tampico	Cap Polonio
412165	A	56757	1	6360	27/10/06	30/10/06	05/11/06	13/11/06	13/11/06	Tampico	Cap Polonio
412165	A	56758	1	6360	27/10/06	30/10/06	05/11/06	13/11/06	13/11/06	Tampico	Cap Polonio
412165	A	56759	1	6360	30/10/06	01/11/06	05/11/06	13/11/06	13/11/06	Tampico	Cap Polonio
412165	A	56760	1	6360	30/10/06	01/11/06	05/11/06	13/11/06	13/11/06	Tampico	Cap Polonio
412165	A	56761	1	6360	30/10/06	01/11/06	05/11/06	13/11/06	13/11/06	Tampico	Cap Polonio
412333	B	58030	2	1395	29/10/06		07/11/06		07/11/06	Callao	Aliança Andes
412333	B	58031	2	1395	29/10/06		07/11/06		07/11/06	Callao	Aliança Andes
412333	B	58032	2	1395	29/10/06		07/11/06		07/11/06	Callao	Aliança Andes
412333	B	58033	2	1395	30/10/06		07/11/06		07/11/06	Callao	Aliança Andes
412333	B	58034	2	1395	30/10/06		07/11/06		07/11/06	Callao	Aliança Andes
412333	B	58035	2	1395	30/10/06		07/11/06		07/11/06	Callao	Aliança Andes
412333	B	58036	2	1395	30/10/06		07/11/06		07/11/06	Callao	Aliança Andes
412341	B	58112	2	800	22/10/06		07/11/06		07/11/06	Callao	Aliança Andes
412341	B	58113	2	800	22/10/06		07/11/06		07/11/06	Callao	Aliança Andes
412341	B	58114	2	800	22/10/06		07/11/06		07/11/06	Callao	Aliança Andes
412341	B	58115	2	800	27/10/06		07/11/06		07/11/06	Callao	Aliança Andes
411882	C	54106	1	11756	23/10/06		01/11/06		02/11/06	Xingang	Clan Intre Pid
411882	C	54107	1	11756	22/10/06		01/11/06		02/11/06	Xingang	Clan Intre Pid
411882	C	54108	1	11756	24/10/06		01/11/06		02/11/06	Xingang	Clan Intre Pid
411882	C	54109	1	11756	24/10/06		01/11/06		02/11/06	Xingang	Clan Intre Pid
412059	D	55938	3	745	08/10/06		18/11/06		20/11/06	Puerto Limon	Cap Blanco
412077	D	55997	2	1349	08/10/06		18/11/06		20/11/06	Puerto Limon	Cap blanco
412083	D	56010	2	1788	08/10/06		18/11/06		20/11/06	Puerto Limon	Cap Blanco
412083	D	56011	2	1788	08/10/06		18/11/06		20/11/06	Puerto Limon	Cap Blanco
412084	D	56012	3	1869	30/10/06		18/11/06		20/11/06	Puerto Limon	Cap Blanco
412168	E	56857	3	1536	26/10/06		09/11/06		08/11/06	Cartagena	Cala Porto Fino
412345	E	58146	2	625	18/10/06		09/11/06		08/11/06	Cartagena	Cala Porto Fino
412345	E	58147	2	625	18/10/06		09/11/06		08/11/06	Cartagena	Cala Porto Fino
412346	E	58148	2	625	22/10/06		09/11/06		08/11/06	Cartagena	Cala Porto Fino
412346	E	58149	2	625	22/10/06		09/11/06		08/11/06	Cartagena	Cala Porto Fino
412347	E	58150	2	625	29/10/06		09/11/06		08/11/06	Cartagena	Cala Porto Fino

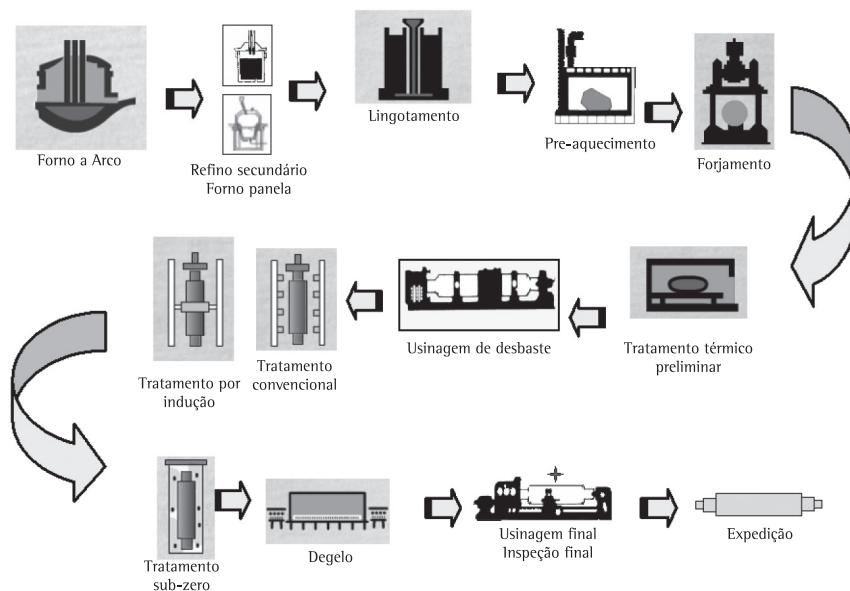


Figura 5. Sequência da produção de cilindros forjados.

térmico. A Figura 6 apresenta esquema com a sequência do fluxo de operações ao longo da UTT.

Os cilindros, ao entrarem na UTT, são armazenados no estoque de entrada. A partir daí, o processo pode ser dividido em três partes: a preparação para o tratamento térmico, o tratamento térmico e a usinagem final.

Durante a fase de preparação para o tratamento térmico, os cilindros passam por uma mandriladora para receber os furos de centro. A seguir, eles são encaminhados para os tornos de desbaste (gargalo do sistema) e de acabamento. Depois da passagem pelo torno de acabamento, o cilindro ainda passa por um outro torno que realiza as operações de faceamento e de furação dos centros. Finalmente, após a realização de todas essas etapas, o cilindro está pronto para ser tratado termicamente.

A fase de tratamento térmico tem início com a realização de um pré-aquecimento, o qual é seguido, na maioria dos casos, pelos processos de têmpera por indução (TPI), subzero e degelo. Após o degelo, eles são encaminhados para os fornos de revenimento. Na fase de usinagem final, os cilindros passam novamente pelo torno de face/centro, sendo, a seguir, encaminhados para o torno de acabamento. Depois do torno de acabamento, eles devem ser retificados e fresados, não importando qual dos dois processos será realizado primeiro. Após a passagem pelos processos de retificação e fresamento, os cilindros estão prontos para serem embalados e transportados para seu comprador.

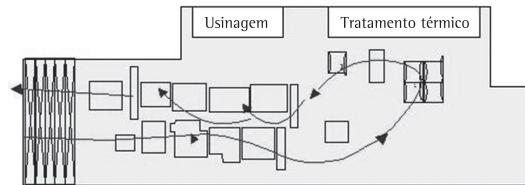


Figura 6. Sequência do fluxo de operação.

#### 4.2. Modelo de planejamento/gestão da produção

##### 4.2.1. Descrição do sistema real e elaboração do modelo de PLI

Como a Forjaria tem uma capacidade de produção muito maior do que a da UTT (essa capacidade não será revelada por confidencialidade) e como ela é capaz de manter o setor de usinagem e tratamento térmico abastecido ininterruptamente, ela não foi considerada uma restrição.

O modelo de PLI foi elaborado com base na capacidade do equipamento gargalo: cada torno de desbaste opera efetivamente 18 horas por dia. Como há dois tornos de desbaste, pode-se definir mais uma restrição do sistema: a soma dos tempos de desbaste dos cilindros que serão usinados num mesmo dia não deve exceder 36 horas. Esta simplificação pode ser adotada, pois este é um processo contínuo, que possui um tempo máximo de operação de 9 horas.

Embora esta formulação não garanta dois sublots de 18 horas, na prática essa simplificação é possível, uma vez que se pode antecipar o início da produção de um lote seguinte no torno que ficou “ocioso”. Não é necessário esperar a conclusão de um lote nos dois tornos para dar início à produção do lote seguinte.

Analizando o setor de tratamento térmico foi possível encontrar outra restrição: os fornos de pré-aquecimento e de revenimento têm capacidade para cinco cilindros.

Assim, foram escolhidas como as variáveis de decisão as variáveis binárias  $C_{i,j}$  em que  $i$  se refere ao número do cilindro a ser agrupado e  $j$  ao número do lote de usinagem a que pertence esse cilindro. A Função Objetivo foi maximizar o tempo de utilização dos tornos:

$$\text{Max } T = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n T_i \cdot C_{i,j}, \text{ onde } T_i \text{ é o tempo de usinagem do cilindro } i$$

As restrições foram:

Cada cilindro pode pertencer a um único lote:

$$\sum_{j=1}^n C_{i,j} \leq 1 (i = 1, 2, \dots, m) m: \text{número total de cilindros}; \\ \text{A soma dos tempos de usinagem num mesmo lote não deve exceder 36 horas:}$$

$$\sum_{i=1}^m T_i \cdot C_{i,j} \leq 36 (j = 1, 2, \dots, n) n: \text{número total de lotes};$$

A soma dos pesos dos lingotes de uma corrida (descontadas as perdas do processo) não deve exceder 86 t:

$$\sum_{i=1}^m P_i \cdot C_{i,j} \leq 86000 (j = 1, 2, \dots, n); \text{ e}$$

Cada lote deve ter, no máximo, 5 cilindros:

$$\sum_{i=1}^m C_{i,j} \leq 5 (j = 1, 2, \dots, n).$$

Uma vez elaborado, o modelo de PLI foi implantado no Excel, utilizando a ferramenta Solver®. Como resultado, foi gerada uma solicitação de lingotes (Figura 7) que foi utilizada posteriormente para alimentar o modelo de simulação.

SOLICITAÇÃO DE LINGOTES-FON											
DATA	LINGOTE	PESO	PESO	Lote	CLIENTE	PRODUTO	DATA	PESO	Peso	Peso	Lote
PERDIDA	Lote	PERDIDA	Lote	PERDIDA							
5/6/2012	999 A	9,6	84,7	V303	A	43246	43277	43295	43309	43317	43323
5/6/2012	999 A	9,7	V303	A	43247	43278	43296	43310	43318	43324	
5/6/2012	999 A	9,7	V303	A	43248	43279	43297	43311	43319	43325	
5/6/2012	999 A	9,7	V303	A	43249	43280	43298	43312	43320	43326	
5/6/2012	999 A	9,7	V303	A	43250	43281	43309	43323	43321	43327	
5/6/2012	999 A	9,7	V303	A	43251	43282	43300	43324	43322	43328	
5/6/2012	999 A	9,7	V303	A	43252	43283	43301	43325	43323	43329	
5/6/2012	999 A	9,7	V303	A	43253	43284	43302	43326	43324	43330	
5/6/2012	999 A	9,7	V303	A	43254	43285	43303	43327	43325	43331	
5/6/2012	999 A	9,7	V303	A	43255	43286	43304	43328	43326	43332	
5/6/2012	999 A	9,6	V303	B	43256	43287	43305	43329	43327	43333	
5/6/2012	999 A	9,6	V303	B	43257	43288	43306	43330	43328	43334	
5/6/2012	999 A	9,6	V303	B	43258	43289	43307	43331	43329	43335	
5/6/2012	999 A	9,6	V303	B	43259	43290	43308	43332	43330	43336	
5/6/2012	999 A	9,6	V303	B	43260	43291	43309	43333	43331	43337	
5/6/2012	999 A	9,6	V303	B	43261	43292	43310	43334	43332	43338	
5/6/2012	999 A	9,6	V303	B	43262	43293	43311	43335	43333	43339	
5/6/2012	999 A	9,6	V303	B	43263	43294	43312	43336	43334	43340	
5/6/2012	999 A	9,6	V303	B	43264	43295	43313	43337	43335	43341	
5/6/2012	999 A	9,6	V303	B	43265	43296	43314	43338	43336	43342	
5/6/2012	999 A	9,6	V303	B	43266	43297	43315	43339	43337	43343	
5/6/2012	999 A	9,6	V303	B	43267	43298	43316	43340	43338	43344	
5/6/2012	999 A	9,6	V303	B	43268	43299	43317	43341	43339	43345	
5/6/2012	999 A	9,6	V303	B	43269	43300	43318	43342	43340	43346	
5/6/2012	999 A	9,6	V303	B	43270	43301	43319	43343	43341	43347	
5/6/2012	999 A	9,6	V303	B	43271	43302	43320	43344	43342	43348	
5/6/2012	999 A	9,6	V303	B	43272	43303	43321	43345	43343	43349	
5/6/2012	999 A	9,6	V303	B	43273	43304	43322	43346	43344	43350	
5/6/2012	999 A	9,6	V303	B	43274	43305	43323	43347	43345	43351	
5/6/2012	999 A	9,6	V303	B	43275	43306	43324	43348	43346	43352	
5/6/2012	999 A	9,6	V303	B	43276	43307	43325	43349	43347	43353	
5/6/2012	999 A	9,6	V303	B	43277	43308	43326	43350	43348	43354	
5/6/2012	999 A	9,6	V303	B	43278	43309	43327	43351	43349	43355	
5/6/2012	999 A	9,6	V303	B	43279	43310	43328	43352	43350	43356	
5/6/2012	999 A	9,6	V303	B	43280	43311	43329	43353	43351	43357	
5/6/2012	999 A	9,6	V303	B	43281	43312	43330	43354	43352	43358	
5/6/2012	999 A	9,6	V303	B	43282	43313	43331	43355	43353	43359	
5/6/2012	999 A	9,6	V303	B	43283	43314	43332	43356	43354	43360	
5/6/2012	999 A	9,6	V303	B	43284	43315	43333	43357	43355	43361	
5/6/2012	999 A	9,6	V303	B	43285	43316	43334	43358	43356	43362	
5/6/2012	999 A	9,6	V303	B	43286	43317	43335	43359	43357	43363	
5/6/2012	999 A	9,6	V303	B	43287	43318	43336	43360	43358	43364	
5/6/2012	999 A	9,6	V303	B	43288	43319	43337	43361	43359	43365	
5/6/2012	999 A	9,6	V303	B	43289	43320	43338	43362	43360	43366	
5/6/2012	999 A	9,6	V303	B	43290	43321	43339	43363	43361	43367	
5/6/2012	999 A	9,6	V303	B	43291	43322	43340	43364	43362	43368	
5/6/2012	999 A	9,6	V303	B	43292	43323	43341	43365	43363	43369	
5/6/2012	999 A	9,6	V303	B	43293	43324	43342	43366	43364	43370	
5/6/2012	999 A	9,6	V303	B	43294	43325	43343	43367	43365	43371	
5/6/2012	999 A	9,6	V303	B	43295	43326	43344	43368	43366	43372	
5/6/2012	999 A	9,6	V303	B	43296	43327	43345	43369	43367	43373	
5/6/2012	999 A	9,6	V303	B	43297	43328	43346	43370	43368	43374	
5/6/2012	999 A	9,6	V303	B	43298	43329	43347	43371	43369	43375	
5/6/2012	999 A	9,6	V303	B	43299	43330	43348	43372	43370	43376	
5/6/2012	999 A	9,6	V303	B	43300	43331	43349	43373	43371	43377	
5/6/2012	999 A	9,6	V303	B	43301	43332	43350	43374	43372	43378	
5/6/2012	999 A	9,6	V303	B	43302	43333	43351	43375	43373	43379	
5/6/2012	999 A	9,6	V303	B	43303	43334	43352	43376	43374	43380	
5/6/2012	999 A	9,6	V303	B	43304	43335	43353	43377	43375	43381	
5/6/2012	999 A	9,6	V303	B	43305	43336	43354	43378	43376	43382	
5/6/2012	999 A	9,6	V303	B	43306	43337	43355	43379	43377	43383	
5/6/2012	999 A	9,6	V303	B	43307	43338	43356	43380	43378	43384	
5/6/2012	999 A	9,6	V303	B	43308	43339	43357	43381	43379	43385	
5/6/2012	999 A	9,6	V303	B	43309	43340	43358	43382	43380	43386	
5/6/2012	999 A	9,6	V303	B	43310	43341	43359	43383	43381	43387	
5/6/2012	999 A	9,6	V303	B	43311	43342	43360	43384	43382	43388	
5/6/2012	999 A	9,6	V303	B	43312	43343	43361	43385	43383	43389	
5/6/2012	999 A	9,6	V303	B	43313	43344	43362	43386	43384	43390	
5/6/2012	999 A	9,6	V303	B	43314	43345	43363	43387	43385	43391	
5/6/2012	999 A	9,6	V303	B	43315	43346	43364	43388	43386	43392	
5/6/2012	999 A	9,6	V303	B	43316	43347	43365	43389	43387	43393	
5/6/2012	999 A	9,6	V303	B	43317	43348	43366	43390	43388	43394	
5/6/2012	999 A	9,6	V303	B	43318	43349	43367	43391	43389	43395	
5/6/2012	999 A	9,6	V303	B	43319	43350	43368	43392	43390	43396	
5/6/2012	999 A	9,6	V303	B	43320	43351	43369	43393	43391	43397	
5/6/2012	999 A	9,6	V303	B	43321	43352	43370	43394	43392	43398	
5/6/2012	999 A	9,6	V303	B	43322	43353	43371	43395	43393	43399	
5/6/2012	999 A	9,6	V303	B	43323	43354	43372	43396	43394	43400	
5/6/2012	999 A	9,6	V303	B	43324	43355	43373	43397	43395	43401	
5/6/2012	999 A	9,6	V303	B	43325	43356	43374	43398	43396	43402	
5/6/2012	999 A	9,6	V303	B	43326	43357	43375	43399	43397	43403	
5/6/2012	999 A	9,6	V303	B	43327	43358	43376	43400	43398	43404	
5/6/2012	999 A	9,6	V303	B	43328	43359	43377	43401	43399	43405	
5/6/2012	999 A	9,6	V303	B	43329	43360	43378	43402	43400	43406	
5/6/2012	999 A	9,6	V303	B	43330	43361	43379	43403	43401	43407	
5/6/2012	999 A	9,6	V303	B	43331	43362	43380	43404	43402	43408	
5/6/2012	999 A	9,6	V303	B	43332	43363	43381	43405	43403	43409	
5/6/2012	999 A	9,6	V303	B	43333	43364	43382	43406	43404	43410	
5/6/2012	999 A	9,6	V303	B	43334	43365	43383	43407	43405	43411	
5/6/2012	999 A	9,6	V303	B	43335	43366	43384	43408	43406	43412	
5/6/2012	999 A	9,6	V303	B	43336	43367	43385	43409	43407	43413	
5/6/2012	999 A	9,6	V303	B	43337	43368	43386	43410	43408	43414	
5/6/2012	999 A	9,6	V303	B	43338	43369	43387	43411	43409	43415	
5/6/2012	999 A	9,6	V303	B	43339	43370	43388	43412	43410	43416	
5/6/2012	999 A	9,6	V303	B	4334						

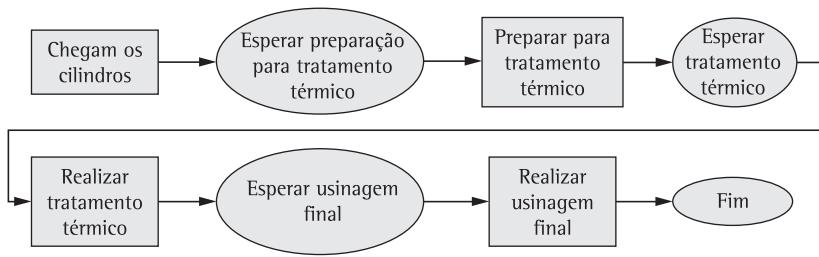


Figura 8. Modelo formal das fases fundamentais do processo.

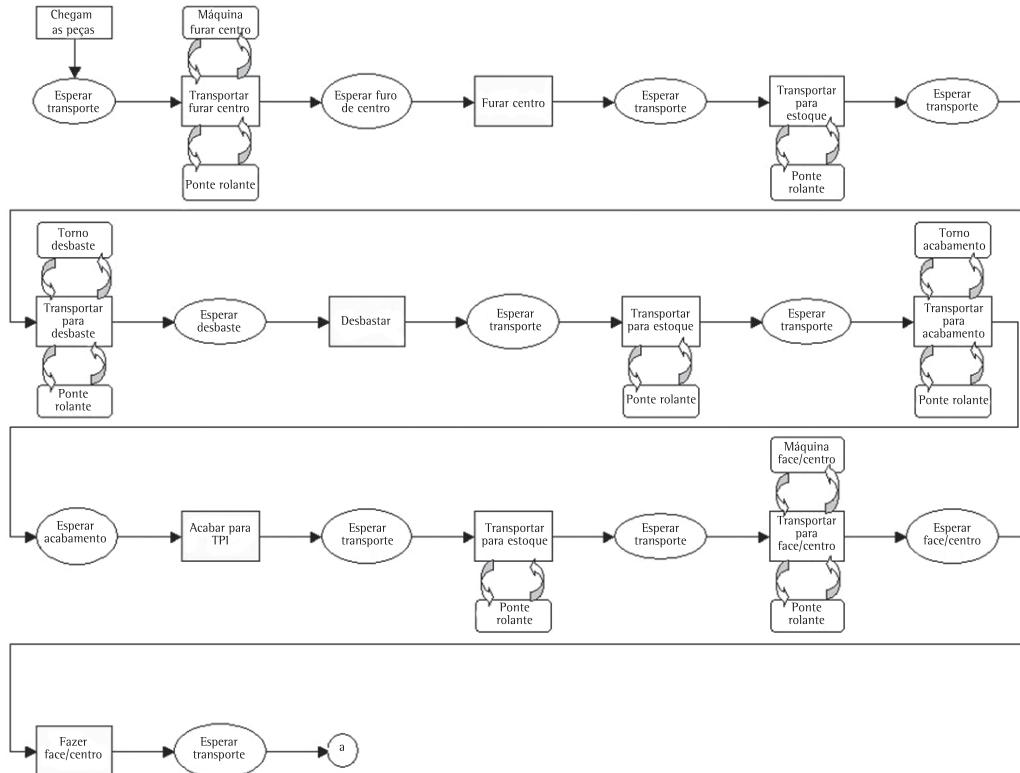


Figura 9. Modelo formal para a fase de preparação para tratamento térmico.

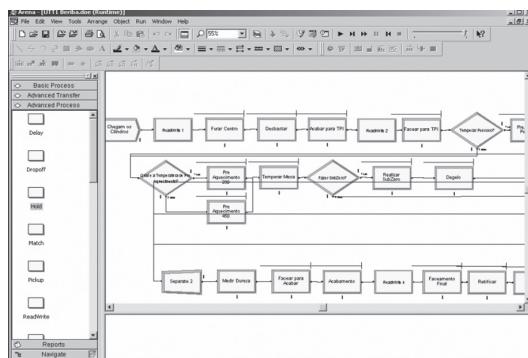


Figura 10. Modelagem através do Arena®.

Os dados de entrada para o modelo de simulação foram os resultados do modelo de PLI e as informações contidas no sistema SAP da empresa, conforme

Tabela 2 (dados representados por letras não são apresentados por confidencialidade). Tais informações contemplam os tempos de processo de usinagem, as temperaturas e tempos de tratamento térmico.

#### 4.3.3. Validação do modelo

Primeiramente, foi determinado o período de aquecimento (*warm-up*) do modelo computacional = 10 dias. Na sequência, determinou-se o número de replicações a ser utilizado em cada simulação, utilizando-se a Equação 2. Para isso, foi analisado o histórico do sistema real para estimar a média e o desvio padrão do número de cilindros produzidos no período de um mês (os dados utilizados foram de 14 meses). Os dados e resultados estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 2. Dados de entrada Tabela 1 do Arena®.

Cilindro	OV	Temperatura aquecimento (°C)	Temperatura revenimento (°C)	Têmpera pescoço (°C)	Subzero (°C)	Furar	Desbastar (h)	Acabar para TPI (h)	Face centro (h)
48213	411127	A	X	0	0	1,5	6	3	1
59218	412503	A	Y	0	-	1,5	7	4	1
59219	412503	B	Z	0	-	1,5	7	4	1
63227	413129	A	X	Y	-	1,5	5	3	1
59220	412503	B	Z	0	-	1,5	7	4	1
59221	412503	B	Z	0	-	1,5	4,5	4	1
Cilindro	OV	Temperar mesa	Degelo	Revenir	Face centro	Acabamento (h)	Face centro	Retifica (h)	Fresar
48213	411127	2,5	0	C	2	8	4	8	6
59218	412503	2,5	D	C	2	8	5	10	9
59219	412503	2,5	D	C	2	8	5	20	9
63227	413129	2,5	D	D	2	10	3	8	8
59220	412503	2,5	D	D	2	7	5	9	9
59221	412503	2,5	D	D	2	7	5	9	9

Executando-se o modelo computacional e realizando-se as 7 replicações, encontrou-se uma média de 128 cilindros/mês. Como  $128 < 130$ , foi necessário repetir o procedimento anterior. O número de replicações novamente encontrado foi 7. Realizando-se a nova simulação, encontrou-se uma média de 128 cilindros/mês. Assim, o número de replicações a ser realizado em cada simulação do modelo computacional foi de 7 replicações.

Definido o número de replicações, o passo seguinte foi validar o modelo computacional. Para essa validação foram considerados apenas os meses isentos de causas especiais (paradas para manutenção, por exemplo). A Tabela 4 apresenta a produção nos meses isentos de causas especiais.

Para validar o modelo computacional, foram realizadas simulações com os dados históricos da empresa. A seguir, os resultados das simulações foram comparados com os valores da produção real, mês a mês. A Tabela 5 mostra os resultados das 7 replicações realizadas no mês A.

Utilizou-se o teste de hipóteses de uma média com o desvio padrão desconhecido, conforme a Equação 1:

Para um risco  $\alpha = 5\%$ :

$$\begin{cases} H_0 : \mu_{\text{modelo}} = 130 \\ H_1 : \mu_{\text{modelo}} \neq 130 \end{cases}$$

$$t_{\text{calculado}} = \frac{\bar{x} - \mu}{s/\sqrt{n}} = \frac{128 - 130}{3,185/\sqrt{7}} \Rightarrow t_{\text{calculado}} = 1,66$$

$$t_{\text{crítico}} = t_{6,25\%} = 2,447$$

Como  $t_{\text{calculado}} < t_{\text{crítico}}$ ,  $H_0$  não foi rejeitada. Portanto, a média do número de cilindros produzidos no mês A, obtida através do modelo computacional, pode ser considerada igual à quantidade produzida pelo

Tabela 3. Resultado para determinar o número de replicações.

Média (14 meses)	130
Desvio padrão (14 meses)	4,81
$r$ (Precisão desejada)	3%
$1 - \alpha$ (Nível de confiança)	5%
$n$ (Número de replicações)	7

Tabela 4. Histórico da quantidade de cilindros produzidos nos meses isentos de causas especiais.

Mês	A	B	C	D	E	F	G	H
Produção	130	129	130	131	130	129	131	130

Tabela 5. Resultados da simulação para o mês após 7 replicações.

Replicação	1	2	3	4	5	6	7
Produção	123	129	128	132	131	129	125
Média = 128						Desvio padrão = 3,185	

Tabela 6. Validação do modelo computacional.

Mês	Produção real	Produção simulada	Desvio padrão	$t_{\text{calculado}}$
A	130	128	3,185	1,66
B	129	128	3,393	0,78
C	130	131	2,436	1,09
D	131	130	3,486	0,76
E	130	128	3,053	1,73
F	129	131	2,597	2,04
G	131	132	3,718	0,71
H	130	130	2,934	0

sistema real. Repetindo-se o procedimento para os demais meses, obtém-se a Tabela 6.

Todos os valores de  $t_{\text{calculado}}$  foram menores que o valor de  $t_{\text{crítico}}$ . Assim, para um risco  $\alpha$  de 5%, pode-se dizer que o modelo criado reproduziu de maneira

satisfatória o comportamento do sistema real e o modelo foi, portanto, validado.

Esse modelo foi utilizado para determinar a sequência de usinagem do equipamento gargalo (no caso, o torno de acabamento), definindo o momento de entrada dos cilindros para o tratamento térmico e para a usinagem final.

Além disso, o modelo foi utilizado para prever a data de saída dos cilindros e para analisar o comportamento do sistema quando novos recursos forem adicionados à linha de produção.

#### 4.4. Apresentação e discussão dos resultados

Os resultados deste trabalho podem ser divididos basicamente em duas partes. A primeira parte refere-se aos resultados obtidos com o modelo de planejamento/gestão da produção; a segunda, aos resultados obtidos com o modelo de simulação.

##### 4.4.1. Resultados obtidos a partir do modelo de planejamento/gestão da produção

A aplicação do modelo de planejamento/gestão da produção trouxe os seguintes resultados:

- Melhor agrupamento entre os cilindros com características semelhantes – Isso melhorou a ocupação dos fornos de tratamento térmico, reduziu o número de *set-ups* e homogeneizou o número de horas dos lotes de usinagem das corridas. A Figura 11 mostra os tempos de desbaste por lote, obtidos pela aplicação do Solver® e aqueles obtidos manualmente para um determinado mês; e
- Melhoria na data de acerto dos cilindros – Foi realizada uma comparação entre as médias de acerto antes e após a implantação do modelo de planejamento/gestão, utilizando o método de Aspin-Welch. O resultado encontra-se na Tabela 7.

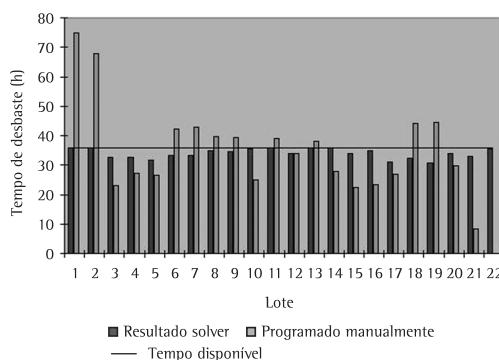


Figura 11. Tempos de desbaste por lote, obtidos pelo Solver® e obtidos manualmente.

Como  $t_{calculated} > t_{crítico}$ ,  $H_0$  pode ser rejeitada. Portanto, pode-se afirmar, com  $\alpha = 5\%$ , que houve uma melhoria no acerto da data de remessa após a implantação do modelo de planejamento/gestão da produção. A taxa de acertos aumentou de 66% para 71% (em média).

- Definição da sequência de nascimento dos cilindros (solicitação de lingotes) – O que viabiliza e facilita o emprego do modelo de simulação.

##### 4.4.2. Resultados obtidos a partir do modelo de simulação

O software Arena® gera um relatório de resultados para todas as simulações realizadas. Esse relatório exibe informações como o número de cilindros produzidos, a ocupação média dos equipamentos e o tempo e tamanho médio das filas.

Além dos resultados obtidos nesse relatório, os seguintes resultados adicionais foram alcançados:

- Com a utilização dessa solução (simulação-otimização), foi possível fazer a gestão de um equipamento que não era gargalo do sistema (torne de acabamento), mas que tinha potencial de provocar interferências em todo o sistema se fosse mal administrado. Conforme explicado no item 4.1, esse equipamento participa do processo em dois momentos distintos (preparação para tratamento térmico e acabamento para retíficas). Se não houver um bom sincronismo entre as duas etapas, poderá ocorrer um desabastecimento de parte da linha de produção.

A Tabela 8 exibe a sequência em que os cilindros devem ser processados nos tornos de acabamento de forma a diminuir a probabilidade de ocorrer

Tabela 7. Resultado do método Aspin-Welch.

	Média	Desvio padrão	Variância	n	w	v	$t_{calc}$	$t_{10,2,5\%}$
Antes da implantação	85,6	4,2	17,6	7	2,52			
Após a implantação	92,7	2,08	4,33	3	1,44		10	3,57 2,23

Tabela 8. Fluxo de produção dos tornos de acabamento.

Número do cilindro	Ir para
50591	Tratamento térmico
50931	Tratamento térmico
54834	Tratamento térmico
54835	Tratamento térmico
63227	Acabamento
59218	Acabamento
59219	Acabamento
54996	Tratamento térmico
59220	Tratamento térmico

desabastecimento dos equipamentos, garantindo uma maior continuidade do fluxo de produção.

- Previsão da data em que o cilindro ficará pronto. A Tabela 9 ilustra a saída gerada pelo software Arena®;
- Melhoria no acerto da data de remessa dos cilindros. A Tabela 10 mostra a taxa de acerto antes e após a implementação do modelo no sistema e a Tabela 11 mostra a comparação entre as médias antes e após a implementação do modelo computacional (método Aspin-Welch). Como  $t_{calulado} > t_{crítico}$ ,  $H_0$  pode ser rejeitado. Portanto, pode-se afirmar, com  $\alpha = 5\%$ , que há uma melhoria do acerto da data de remessa após a implantação do modelo de planejamento/gestão da produção. A taxa de acerto aumentou de 93 para 118 cilindros por mês (em média) ou, em termos percentuais, de 71% para 91%, reduzindo o número de reprogramações de embarque e proporcionando melhor atendimento ao cliente; e

Tabela 9. Data de remessa dos cilindros.

Cilindro	Data de remessa
59343	1/8/2007
59318	1/8/2007
59319	2/8/2007
57458	2/8/2007
56190	2/8/2007
56191	3/8/2007
45980	3/8/2007
51586	3/8/2007

Tabela 10. Acerto na data de remessa dos cilindros.

	Mês	Acerto (%)	Acerto (quantidade de cilindros)
Antes da implantação	5/jul.	70	91
	6/jul.	73	95
	7/jul.	71	92
Após a implantação	8/jul.	89	116
	9/jul.	92	120

Tabela 11. Resultado do método Aspin-Welch.

	Média	Desvio padrão	Variância	n	N	w	v	$t_{calc}$	$t_{3,2,5\%}$
Antes da implantação	92,7	2,08	4,33	3	3			3	10,8
Após a implantação	118	2,83	8	2	2				3,18

Tabela 12. Resultados da simulação para o novo cenário.

Replicação	1	2	3	4	5	6	7
Produção	138	141	139	141	146	143	146
Média = 142		Desvio padrão = 3,162					

$$\bar{X} = 142; s = 3,162; \alpha = 5\%; n = 7$$

- Previsão da nova capacidade da UTT após aquisição de novo torno de acabamento: realizando nova simulação com um torno de acabamento a mais, foram obtidos os resultados (quantidade de cilindros produzida em cada uma das 7 replicações) da Tabela 12.

O intervalo de confiança foi obtido pela Equação 3, substituindo-se  $\sigma$  por  $s$  e a distribuição normal pela distribuição t-Student:

$$t_{6,2,5\%} \frac{s}{\sqrt{n}} = 2,447 \cdot \frac{3,162}{\sqrt{7}} = 2,92$$

$$P(142 - 2,92 \leq \mu \leq 142 + 2,92) = 1 - 0,05$$

$$P(139,08 \leq \mu \leq 144,92) = 95\%$$

Portanto, após 7 replicações, o modelo indica, com 95% de confiança, que o novo sistema terá uma capacidade de 139 a 145 cilindros por mês.

## 5. Conclusão

Este trabalho visou a redução dos tempos mortos com aumento da produtividade da área analisada. A aplicação e a implantação do método aqui descrito, na empresa siderúrgica que foi objeto do estudo, geraram resultados satisfatórios, pois o melhor gerenciamento do gargalo possibilitou prever, com maior exatidão, o fluxo da produção, garantindo um fluxo contínuo e melhor previsibilidade do acerto do prazo de entrega ao cliente. Os resultados gerados pela simulação alimentam um quadro de gestão à vista, para que os operadores do equipamento gargalo possam seguir o fluxo proposto.

A melhoria no acerto da data final do produto (de 70% para 90%) facilitou o fluxo logístico de entrega ao cliente final. Uma vez que 80% da produção destinam-se ao mercado externo, o aumento na taxa de acerto permite realizar a reserva dos navios (95% da produção utiliza a modalidade marítima para a exportação) com maior antecedência do que anteriormente.

Além dos ganhos acima citados, a aplicação da simulação ajudou a planejar a gestão da produção antes da execução, trazendo novos *insights*, que contribuirão para o melhor entendimento dos problemas que podem comprometer o desempenho dos recursos gargalos.

Finalmente, vale ressaltar que o papel da manufatura pode ser visto como uma arma de competitividade das empresas. A utilização correta da PLI e da simulação, como apresentado neste trabalho, é uma forma eficaz de melhorar o planejamento da produção, com melhor previsibilidade dos prazos de entrega e, consequentemente, melhor atendimento do cliente.

## Referências

- ARENALES, M. et al. *Pesquisa Operacional - Modelagem e Algoritmos*. Rio de Janeiro: Elsevier, 2007.
- AZADIVAR, F. Simulation optimization methodologies. In: WINTER SIMULATION CONFERENCE, 31., 1999, Phoenix. *Proceedings...* Phoenix, 1999. v. 1, p. 93-100.
- BALCI, O. Verification, validation and accreditation of simulation models. In: WINTER SIMULATION CONFERENCE, 1997, Atlanta. *Proceedings...* Atlanta, 1997.
- BATEMAN, R. E.; BOWDEN, R. O. *Simulação Otimizando os Sistemas*. 2. ed. São Paulo: Imam, 2002.
- BLACKSTONE, J. H. Theory of Constraints - a status report. *International Journal of Production Research*, v. 39, n. 6, p. 1053-1080, 2001. <http://dx.doi.org/10.1080/00207540010028119>
- BUSH, A.; BILES, W. E.; DEPUY, G. W. Iterative optimization and simulation of barge traffic on an inland waterway. In: WINTER SIMULATION CONFERENCE, 2003, New Orleans. *Proceedings...* New Orleans, 2003. p. 1751-1756.
- CARDOSO, D. F.; VINHOZA, T. T. V.; SAMPAIO NETO, R. A simulação como ferramenta de auxílio na avaliação de um sistema de comunicação CDMA com multiphas portadoras. In: SIMPÓSIO DE PESQUISA OPERACIONAL E LOGÍSTICA DA MARINHA, 10., 2007, Rio de Janeiro. *Anais...* SPOLM, 2007.
- CECILIANO, W. R. A. *Aplicação de um método de simulação-otimização na cadeia produtiva de minérios de ferro*. 2007. 209 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Sistemas Logísticos)-Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.
- CHWIF, L.; MEDINA, A. C. *Modelagem e simulação de eventos discretos: teoria e aplicações*. São Paulo: Bravarte, 2006.
- COSTA NETO, P. L. O. *Estatística*. 2. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2002. 266 p.
- FERNANDES, L. J. *Aplicação dos conceitos da teoria das restrições, programação linear inteira (PLI) e simulação em uma indústria siderúrgica*. 2008. 149 f. Dissertação (Mestrado em Ciências)-Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2008.
- FU, M. C. Optimization for Simulation: Theory vs. Practice. *Journal on Computing*, v. 14, n. 3, 2002.
- GAVIRA, M. O. *Simulação computacional como uma ferramenta de aquisição de conhecimento*. 2003. 150 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção)-Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.
- GRANGER, J.; KRISHNAMURTHY, A.; ROBINSON, S. M. *Approximation and optimization for stochastic networks*.
- Berlim: Dynamic Stochastic Optimization, 2002. p. 67-79.
- HILLIER, F. S.; LIEBERMAN, G. J. *Introdução à Pesquisa Operacional*. 8. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 2006. 828 p.
- KÖCHEL, P.; KUNZE, S.; NIELÄNDER, U. Optimal control of a distributed service system with moving resources: application to the fleet sizing and allocation problem. *International Journal Production Economics*, v. 81-82 p. 443-459, 2003. [http://dx.doi.org/10.1016/S0925-5273\(02\)00287-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0925-5273(02)00287-6)
- LACHTERMACHER, G. *Pesquisa Operacional na Tomada de Decisões*. Rio de Janeiro: Campus, 2004.
- MONTEVECHI, J. A. B. et al. Análise comparativa entre regras heurísticas de sequenciamento da produção aplicada em job shop. *Produto & Produção*, v. 6, n. 2, p. 12-18, 2002.
- MORITO, S. et al. Simulation based constraint generation with applications to optimization of logistic system design. In: WINTER SIMULATION CONFERENCE, 31., 1999, Phoenix. *Proceedings...* Phoenix, 1999. v. 1, p 531-536.
- OLIVEIRA, F. A.; DUARTE, R. N.; MONTEVECHI, J. A. B. O reflexo da mudança organizacional sobre o desempenho de uma empresa de autoparças: estudo de caso. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 22., 2002, Curitiba. *Anais...* Curitiba: PUC-PR, 2002.
- PAIVA, A. F. O. *Geração automática de modelos de simulação de uma linha de produção na indústria têxtil*. 2005. 225 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Industrial)-Universidade do Minho, Guimarães, 2005.
- PAPADOPOULOS, H. T.; HEAVEY, C.; BROWNE, J. *Queueing Theory in Manufacturing Systems Analysis and Design*. London: Chapman & Hall, 1993.
- PEIXOTO, E. C. *Planejamento de pedidos de compra e estoque de insumos a partir de previsão agregada de vendas e histórico de demanda utilizando simulação*. 2006. 70 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção)-Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006.
- PINHO, A. F. *Metodologia para utilização de algoritmos genéticos em modelos de simulação computacional em ambientes de manufatura*. 2008. 189 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica)-Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2008.
- PINTO JUNIOR, O. P. F. *Simulação e otimização: desenvolvimento de uma ferramenta de análise de decisão para suprimento de refinarias de petróleo através de uma rede de oleodutos*. 2001. 131 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção)-Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2001.

## Production management of rolling mill rolls: a quantitative study case

### Abstract

This article presents a simulation-optimization model application for a real case study in the rolling mill roll sector of a steel plant. The purpose of this study was to get a better area/equipment bottleneck management in the production line. The simulation was used together with an ILP (Integer Linear Programming) optimization model, in order to improve customer service in a made-to-order production. As a result of this ILP and Simulation combined approach, the productive process was optimized and both queues and lead-time were reduced, improving customer service.

### Keywords

Integer linear programming (ilp). Simulation-optimization method. Rolling mill rolls. Made-to-order production.

## Errata

Errata do artigo “Planejamento e controle da produção de cilindros para laminação: um estudo de caso quantitativo” (<http://dx.doi.org/10.1590/S0103-65132012005000061>) publicado em ahead of print em 04 de setembro de 2012.

A referência apresentada no artigo esta incorreta:

BATEMAN, R. E.; BOWDEN, ROYCE O. *Simulação Otimizando os Sistemas*. 2. ed. São Paulo: Imam, 2002.

Correção da referência:

BATEMAN, R. E.; BOWDEN, R. O. *Simulação Otimizando os Sistemas*. 2. ed. São Paulo: Imam, 2002.

As citações presentes no artigo estão incorretas:

(BATEMAN; BOWDEN; ROYCE, 2002)

Correção da citação:

(BATEMAN; BOWDEN, 2002).

A referência apresentada no artigo esta incorreta:

PAPADOPOULOS, H. T.; HEVEY, C.; BROWNE, J. *Queueing Theory in Manufacturing Systems Analysis and Design*. London: Chapman & Hall, 1993.

Correção da referência:

PAPADOPOULOS, H. T.; HEAVEY, C.; BROWNE, J. *Queueing Theory in Manufacturing Systems Analysis and Design*. London: Chapman & Hall, 1993.

A citação apresentada no artigo esta incorreta:

(GRANGER; KRISHNAMURTH; ROBINSON, 2002)

Correção da citação:

(GRANGER; KRISHNAMURTHY; ROBINSON, 2002)