



SPOLM 2008

ISSN 2175-6295

Rio de Janeiro- Brasil, 05 e 06 de agosto de 2008.

PLANEJAMENTO ATRAVÉS DA UTILIZAÇÃO DA PROGRAMAÇÃO LINEAR INTEIRA (PLI) E SIMULAÇÃO

Laerte José Fernandes

ITA

Praça Marechal Eduardo Gomes, 50 Vila das Acácias - CEP 12228-900 – S.J. dos Campos – S.P

laerte.fernandes@villares.com.br

Luis Alberto Osés Rodriguez

DPD - FEG - UNESP

Av Dr. Ariberto Pereira da Cunha, 333 Pedregulhos – CEP 12516-430 Guaratinguetá – S.P

luis.rodrigues@villares.com.br

Anderson Correia

ITA

Praça Marechal Eduardo Gomes, 50 Vila das Acácias - CEP 12228-900 – S.J. dos Campos – S.P

correia@ita.br

Fernando Augusto Silva Marins

DPD - FEG – UNESP

Av Dr. Ariberto Pereira da Cunha, 333 Pedregulhos – CEP 12516-430 Guaratinguetá – S.P

fmarins@feg.unesp.br

RESUMO

Este trabalho apresenta um modelo de simulação para um estudo de caso na unidade de Cilindros para Laminação de Aço Villares S.A. O trabalho teve como finalidade alcançar um melhor gerenciamento da área/equipamento gargalo da linha de produção. A simulação atuará em conjunto com um modelo de otimização PLI (Programação Linear Inteira) desenvolvido anteriormente, com a finalidade de melhorar o atendimento de prazo junto aos clientes. Como resultado, tem-se a otimização do processo produtivo, com foco no gerenciamento da restrição, que ocasiona a redução das filas de espera e do lead time, melhorando o atendimento ao cliente em uma produção não seriada.

Palavras-Chaves: Modelo de simulação; Cilindros de laminação; Programação linear inteira.

ABSTRACT

This work presents a simulation model for a case study in a Steelmaker Industry. The work had as purpose to get a better area/equipment bottleneck management in the production line. The simulation will be used together with an ILP (Integer Linear Programming) model developed previously, with the purpose to improve the customer service. As results of this ILP and Simulation combined approach, which follows a constraint management focus, the productive process was optimized, and both queues and lead time were reduced, improving the

customer service in a make-to-order production.

Keywords: Simulation model; Rolling mill rolls; Integer Linear Programming.

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. Este é o contexto que serve de base para introduzir o assunto deste trabalho.

Diante deste fato, “o objetivo da estratégia de operações é garantir que os processos de produção e entrega de valor ao cliente sejam alinhados com a intenção estratégica da empresa quanto aos resultados financeiros esperados e aos mercados a que pretende servir e adaptados ao ambiente em que se insere” de acordo com Corrêa & Corrêa (2006).

Oliveira, Duarte e Montevechi (2002) afirmam que a produção tem o desafio de desenvolver novas metodologias ou adotar os 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 décadas, percebe-se que alguma coisa mudou, estreitando o relacionamento entre a média e a alta gerência; entretanto, a busca pela integração entre a estratégia e a manufatura ainda parece presente e válida nos dias de hoje. A dinâmica do mercado continua a criar demandas, a área estratégica da empresa define o foco de atuação do negócio, e cabe à função manufatura realizá-las.

Nesta linha de pensamento, Papadopoulos, Heavey e Browne (1993) comentam que uma empresa de manufatura costuma lidar no dia-a-dia 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 a localização de plantas industriais, a aquisição de novos recursos e a 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. Elas dizem respeito 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. Os problemas de alocação de recursos envolvem as atividades de seqüenciamento de lotes de produção – scheduling - que competem por recursos escassos, também chamados, corriqueiramente, de recursos com capacidade finita.

O propósito do presente trabalho foi elaborar um modelo de planejamento e gerenciamento da produção, utilizando a programação linear inteira e avaliar, por meio de um modelo de simulação, as interferências que possam ocorrer durante o processo de fabricação de um cilindro de laminação. Além disso, por meio da simulação, será possível determinar uma melhor gestão do equipamento gargalo, uma vez que este recurso tem que abastecer o setor de tratamento térmico e alimentar as retíficas, de forma a estabelecer prioridades de usinagem e transformar o processo num fluxo contínuo, sem desabastecimento das linhas.

O trabalho está organizado em 8 Seções. A Seção 2 apresenta os princípios da modelagem de sistemas utilizando a programação linear inteira e a simulação de sistemas. A seção 3 apresenta o método de modelagem proposto. A Seção 4 apresenta a descrição do sistema e a elaboração do modelo de PLI. A Seção 5, a definição do modelo formal. A Seção 6 apresenta a simulação do sistema realizado no Software Arena ®. Na Seção 7 é realizada a discussão sobre os resultados. Finalmente, na Seção 8, são apresentadas as conclusões, seguida da bibliografia consultada.

2. MODELAGEM

A evolução da indústria de computadores nas últimas décadas permitiu a difusão da técnica de simulação para os mais variados campos do conhecimento. Progressos notáveis vêm sendo obtidos na operação de sistemas de engenharia, tais como os processos de manufatura, exploração e refino de petróleo, aplicações em ensaios mecânicos de deformação e na engenharia aeroespacial empregando simuladores de vôo.

Para realizar este trabalho, foram utilizadas algumas das técnicas da Pesquisa Operacional (PO): a Programação Linear Inteira e a Simulação de Sistemas.

A PO é um método científico de trabalho que, utilizando técnicas e instrumentos científicos e baseando-se em análises quantitativas, auxilia o processo de decisão e que visa obter o melhor rendimento possível no funcionamento de uma organização ou o melhor desempenho possível de um sistema em estudo. O objetivo geral da Pesquisa Operacional é o de descobrir regularidade em algum fenômeno e ligar essa regularidade com outros conhecimentos, de tal forma que o fenômeno possa ser modificado ou controlado (Hillier, Lieberman, 2001; Lachtermacher, 2004; Arenales et al., 2007).

2.1. MODELAGEM DE SISTEMAS UTILIZANDO A PROGRAMAÇÃO LINEAR INTEIRA

Problemas de Programação Inteira (PPIs) são problemas de programação matemática em que uma ou mais variáveis de decisão são representadas apenas por valores inteiros. Nos Problemas de Programação Linear Inteira tanto a função-objetivo como as restrições são lineares; entretanto, neste tipo de problema, uma ou mais variáveis de decisão são representadas apenas por valores inteiros (Lachtermacher, 2004).

Embora, a rigor, os Problemas de Programação Inteira sejam não-lineares (as restrições x_{ij} inteiro não são restrições lineares), eles podem ser formulados como problemas de Programação Linear com restrições adicionais indicando que algumas (ou todas) variáveis de decisão devem assumir somente valores inteiros (Arenales et al., 2007).

Os PPIs aparecem em diversas situações práticas de diversas áreas, tais como: energia, transportes, telecomunicações, circuitos eletrônicos, biologia molecular, medicina, criptografia, finanças, etc. Além disso, problemas como layout de sistemas de produção, localização de instalações, distribuição de produtos, seqüenciamento de tarefas, solução de problemas logísticos, também podem ser formulados como problemas de programação inteira (Arenales et al., 2007).

Os PPIs são freqüentes porque em muitas situações práticas, as atividades ou recursos (máquinas, locais, pessoas, etc) são indivisíveis.

De acordo com Lachtermacher (2004), um problema de Programação Linear Inteira pode ser descrito matematicamente como:

$$\begin{array}{l} \text{Objetivo: Otimizar } Z = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \\ \text{Sujeito a: } \left. \begin{array}{l} g_1(x_1, x_2, \dots, x_n) \\ g_2(x_1, x_2, \dots, x_n) \\ \cdot \\ \cdot \\ g_m(x_1, x_2, \dots, x_n) \end{array} \right\} \begin{array}{l} \leq \\ \leq \\ = \\ \geq \\ \leq \end{array} \left. \begin{array}{l} b_1 \\ b_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ b_3 \end{array} \right\} \end{array}$$

$$\begin{array}{l} \text{Onde: } x_1, x_2, \dots, x_n \text{ são inteiros} \\ f(x_1, x_2, \dots, x_n) = c_1x_1 + c_2x_2 + \dots + c_nx_n \\ g_i(x_1, x_2, \dots, x_n) = a_{i1}x_1 + a_{i2}x_2 + a_{i3}x_3 + \dots + a_{in}x_n, \text{ para } i = 1, \dots, m \\ n \text{ é o número de variáveis} \\ m \text{ é o número de restrições do problema} \\ i \text{ é o índice de uma determinada restrição } (i = 1, 2, \dots, m) \\ j \text{ é o índice de uma determinada variável } (j = 1, 2, \dots, n) \end{array}$$

2.2. MODELAGEM DE SISTEMAS UTILIZANDO SIMULAÇÃO

A evolução da indústria de computadores nas últimas décadas permitiu a difusão da técnica de simulação para os mais variados campos do conhecimento. Progressos notáveis vêm sendo obtidos na operação de sistemas de engenharia, tais como os processos de manufatura, exploração e refino de petróleo, aplicações em ensaios mecânicos de deformação e na engenharia aeroespacial empregando simuladores de vôo.

Banks et al. (2000) definem que a simulação é a imitação da operação de um processo real ou sistema ao longo do tempo. Mihran & Mihram (1974), citado por Banks et al. (2000), afirmam que todo modelo de representação é uma simplificação de um sistema real. Isto quer dizer que um modelo de simulação é uma réplica reduzida de um conjunto de variáveis de um sistema real. Cabe ao designer do sistema a tarefa de identificar as variáveis, extraí-las do sistema, e correlacioná-las para que, enfim, possa representá-las em um modelo teórico experimental.

Pode-se dizer que a simulação é, antes de tudo, uma técnica experimental que permite avaliar o efeito da mudança de uma variável de entrada ou parâmetro, no comportamento da variável controlada, também chamada de variável de saída do sistema.

Kelton & Law (1991) comentam que os modelos de simulação podem ser determinísticos ou probabilísticos. Modelos determinísticos são aqueles em que todas as variáveis relevantes são assumidas como certas e disponíveis. Modelos probabilísticos ou estocásticos são modelos nos quais os valores de uma ou mais variáveis não são conhecidos com certeza (variáveis randômicas ou aleatórias), mas sabe-se que esta(s) variável(is) segue(m) alguma distribuição de probabilidade conhecida.

Pode-se ter ainda uma combinação de ambos os modelos. Situações em que a taxa de chegada, o tempo entre as chegadas, os tempos de processamento acontecem de forma aleatória, são regidas por distribuições de probabilidades, e são consideradas de natureza probabilística. Caso contrário, são consideradas eventos determinísticos. Há modelos que contemplam tanto parâmetros determinísticos quanto estocásticos e, por isso, as variáveis de saída dos mesmos também são de natureza estocástica.

O sistema pode ser estático, quando suas variáveis são estacionárias, isto é, quando elas não variam com o tempo; ou dinâmico, quando apresenta variáveis transientes.

O sistema é composto por servidores que prestam serviço para as entidades (clientes ou objetos que se movem no sistema). As entidades possuem propriedades que lhes conferem características peculiares, chamadas atributos. Por exemplo, na fabricação de cilindros de laminação, o blank representa a entidade cujo atributo é seguir uma rota particular na linha de produção, sendo transportado por caminhões para as três áreas de usinagem.

É conveniente observar que os resultados de experimentos obtidos através da simulação de sistemas de manufatura ou de qualquer outro sistema dependem das hipóteses simplificadoras adotadas durante a elaboração do modelo. Assim, o analista deve ter percepção suficiente para conseguir extrair do sistema real suas variáveis relevantes e, a partir delas, elaborar um modelo teórico e reduzido que represente com exatidão o sistema observado, conforme Figura 1.

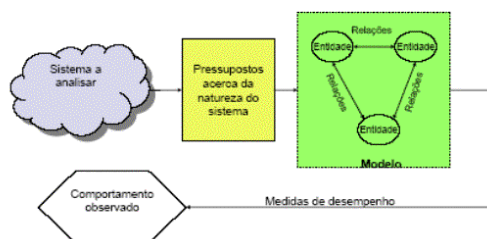


Figura 1: Sistema de modelagem (Fonte: Banks, 2000)

2.2.1. Simulação e Sua Utilização

Simulação é uma técnica de modelagem e análise utilizada para avaliar e aprimorar os

sistemas dinâmicos de todos os tipos, sendo possível, através de seu emprego, estudar o comportamento e as reações de um determinado sistema através de modelos, que reproduzem suas propriedades e comportamentos em uma escala menor, permitindo sua manipulação e seu estudo detalhado.

De acordo com Hillier & Lieberman (cap 1, 2001) a Simulação de Sistemas é uma das técnicas utilizadas pela Pesquisa Operacional (PO) para auxiliar o processo de decisão.

A Simulação é capaz de lidar de maneira eficaz com a variabilidade natural dos processos e proporcionar estimativas das influências destas sobre o desempenho do sistema. Ela fornece uma estrutura de raciocínio e análise que permite resolver problemas mais amplos e mais complexos.

Avaliar alternativas de ação nunca foi tarefa das mais fáceis, principalmente, quando os resultados da escolha de determinada alternativa não são totalmente previsíveis. A simulação é indicada para sistemas em que as conseqüências das relações entre seus diversos componentes não são conhecidas a priori, e que dificilmente poderiam ser traduzidas de maneira analítica.

Segundo Fleury, Wanke e Figueiredo (p. 296, 2000), a simulação é aplicada em tipos de problemas nos quais se necessita:

Proporcionar melhor compreensão sobre a natureza de um processo;

Identificar problemas específicos ou, nas áreas problemáticas de um sistema em particular os gargalos, os estoques intermediários acima do ideal e os recursos eventualmente ociosos;

Auxiliar a estabelecer estratégias de investimento futuro para um sistema já existente, mostrando quando e quanto se tem a ganhar a cada nova etapa;

Testar novos conceitos antes de sua implementação sem interferir na operação de um sistema já instalado e em curso;

Avaliar benefícios de novos investimentos antes que haja um comprometimento de fato dos recursos de uma empresa.

3. O MÉTODO DE MODELAGEM PROPOSTO

A Modelagem e Simulação compreendem o uso de técnicas matemáticas para descrever o funcionamento de um sistema ou parte de um sistema produtivo (BERTO; NAKANO, 2000). Sendo que como uma complementação é o uso de simulação, que consiste no uso de técnicas computacionais para simular a operação de sistemas produtivos, baseado em um conjunto de variáveis em dado domínio, de forma a investigar a relação casual e quantitativa entre variáveis (BERTRAND; FRANSOO, 2002). Foi utilizado um modelo adaptado de Mitroff et al. (1974), Goldbarg & Luna (2000), Law & Kelton (2000) e Bateman & Bowden (2002) conforme Figura 2.

De acordo com Mitroff et al. (1974) na fase da conceitualização o pesquisador faz um modelo conceitual do problema e o sistema que esta estudando. Faz decisões sobre as variáveis que precisam ser incluídas no modelo, o escopo do problema e o modelo para ser endereçado. Na próxima fase, o pesquisador realmente constrói um modelo quantitativo de modo a definir o relacionamento casual entre as variáveis. Depois disto, o modelo de solução as regras matemáticas são dominantes. Finalmente os resultados do modelo são implementados, depois do qual um novo ciclo poderá iniciar.

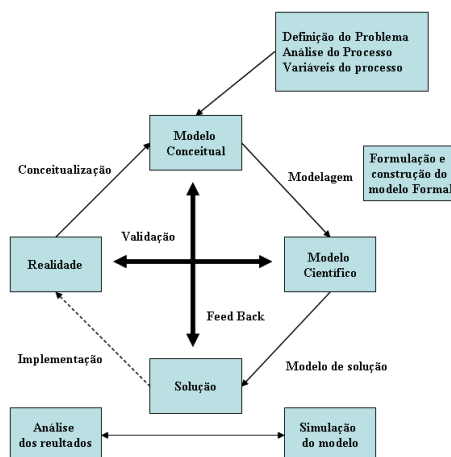


Figura 2: Condução de uma modelagem e simulação (Fonte: Adaptado de Mitroff et al., 1974; Goldberg & Luna, 2000; Law & Kelton (2000); Bateman & Bowden, 2002)

Testar a validação deve ser um esforço cooperativo em equipe entre o modelista/analista, potenciais usuários e outras pessoas familiarizadas com a operação real do sistema (BATEMAN et al.; BOWDEN, 2002).

De acordo com Golbarg & Luna (2000) a solução e o modelo formal trocam informações, um alimentando o outro, criando uma sinergia.

Law & Kelton (2000) resume nos seguintes passos a metodologia da simulação: formulação do problema, planejamento e estudo, coleta de dados, definição do modelo, validação do modelo conceitual, construção e verificação do programa computacional, realização e execução do piloto, validação do modelo programado, experimentação, realização das execuções de simulação, análise dos resultados e implementação.

A definição do problema e estabelecimento de objetivos obtém uma definição precisa e concisa do problema a ser estudado pode ser mais difícil do que parece. Nesta etapa do processo, é necessário definir claramente qual é o problema a ser analisado, quais são as perguntas a serem respondidas, quais são as hipóteses a serem testadas e quais são os efeitos a serem estimados.

A inclusão desnecessária de detalhes irrelevantes resultará em altos custos de modelagem, tempos de resposta mais longos e rodadas de computador mais lentas. Os objetivos de um estudo de simulação fluirão naturalmente a partir da definição do problema, uma vez que o propósito de se executar mais tarde uma experimentação com o modelo será sempre o de resolver o problema.

No desenvolvimento do modelo, este, normalmente iniciará como uma abstração do sistema, com crescentes níveis de detalhes adicionados à medida que se procede ao seu desenvolvimento. O analista, ao construir o modelo, deve ser capaz de pensar abstratamente em conceitos correlatos de sistemas do mundo real para que haja congruência entre a estrutura do modelo e a ferramenta de modelagem em uso. A construção do modelo pode acontecer conjuntamente com a coleta de dados.

A Validação é o processo de se assegurar que o modelo reflete a operação do sistema real em estudo de tal forma que dê encaminhamento ao problema definido. Testar a validação deve ser um esforço cooperativo em equipe entre o modelista/analista, potenciais usuários e outras pessoas familiarizadas com a operação real do sistema.

Um método de testar um modelo envolve o uso de mudanças nos dados de entrada para determinar se o mesmo responde da mesma forma que o modelo real. Alterando o valor de um parâmetro de entrada e comparando o impacto com as respostas conhecidas do sistema, a credibilidade de um modelo pode ser estabelecida. Os resultados deste tipo de teste servirão também como uma análise de sensibilidade para identificar os tipos de informação que merecem esforço adicional de junção de dados. Uma outra forma de validação estabelece o uso de dados de entrada históricos para pilotar o modelo. As saídas do modelo são então comparadas com as saídas históricas para se determinar se as saídas estão acuradas.

Na verificação e reformulação, um modelo estará pronto para ser verificado quando ele funciona da maneira satisfatória como ele foi concebido de acordo com as restrições pré-estabelecidas. A verificação do modelo pode ser efetuada executando-se a simulação e monitorando-se de perto a sua operação.

Na experimentação e aplicação o projeto experimental é o desenvolvimento de

procedimentos e testes para analisar e comparar alternativas, maximizando a utilidade da informação produzida pelas rodadas da simulação, minimizando o esforço.

O ideal é que o analista e demais envolvidos no projeto, tenham pelo menos algumas idéias preliminares sobre as alternativas de soluções a serem avaliadas. Antes de avaliar cada uma com o modelo, o especialista em simulação deverá determinar o tempo para simulação, visando obter resultados aceitáveis.

A análise dos resultados e sua apresentação, cada configuração do modelo e seus respectivos resultados de saída devem ser bem documentados. Além de facilitar relatos eventuais, o armazenamento dos registros irá auxiliar o analista a determinar não apenas que alternativa atinge o melhor resultado, como também permitirá a ele observar tendências que podem sugerir alternativas adicionais a serem consideradas.

4. DESCRIÇÃO DO SISTEMA REAL E ELABORAÇÃO DO MODELO DE PLI

O sistema de produção de cilindros de laminação de tiras a frio pode ser dividido basicamente em três setores: Lingotamento, Forjaria e setor de Usinagem e Tratamento Térmico.

Os cilindros são lingotados e enviados para a Forjaria, onde são prensados com a finalidade de obter-se produtos semi-acabados; em seguida, 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 toneladas de metal líquido.

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.

Como a Forjaria tem uma capacidade de produção muito maior do que a da UTT (por motivos de sigilo, a capacidade da Forjaria não será revelada neste trabalho), e como ela é capaz de manter o setor de Usinagem e Tratamento Térmico abastecido ininterruptamente, ela será tratada como uma “caixa preta” durante a modelagem.

Depois de passar pela Forjaria, os cilindros são encaminhados para o setor de Usinagem e Tratamento Térmico. A Figura 3 mostra um esquema com a seqüência do fluxo de operações ao longo da UTT:

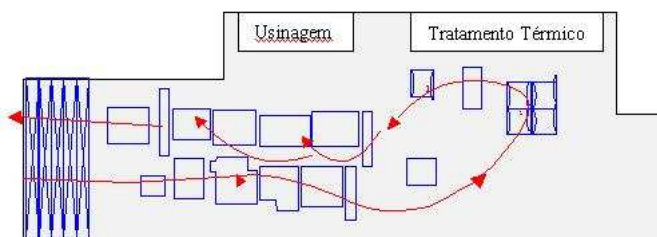


Figura 3: Seqüência do fluxo de operação (Fonte: os autores)

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 realizará as operações de faceamento e de furação dos centros. Finalmente, após a realização de todas estas 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.

Para alguns cilindros, o processo de pré-aquecimento é seguido por um processo de têmpera de pescoço. Nesse caso, após a realização da têmpera de pescoço, eles retornam para o forno de pré-aquecimento e seguem a seqüência normal de operação dos demais cilindros: têmpera, subzero e degelo.

Após o degelo, independentemente dos cilindros terem ou não realizado o processo de têmpera de pescoço, eles são encaminhados para os fornos de revenimento.

Há ainda um terceiro tipo de cilindro, o qual não realiza as operações de subzero e degelo. Esse tipo de cilindro é encaminhado diretamente da têmpera para o forno de revenimento.

Finalmente, independentemente do tipo de cilindro, a segunda fase do processo tem término com a medição da dureza do mesmo.

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 seus compradores.

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.

Analisando o setor de Tratamento Térmico, é possível encontrar outra restrição: os fornos de pré-aquecimento e de revenimento têm capacidade para cinco cilindros.

Com base em tudo o que foi apresentado até o momento, pode-se construir o modelo de Programação Linear Inteira, o qual será também o modelo de planejamento/gerenciamento da produção. A seguir, são definidas as variáveis de decisão, a função-objetivo e as restrições do sistema:

As variáveis de decisão adotadas são variáveis binárias $C_{i,j}$, onde 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 é maximizar o tempo de utilização dos tornos:

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

As restrições adotadas são:

- Cada cilindro pode pertencer a um único lote:

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

- A soma dos tempos de usinagem num mesmo lote não deve exceder 36 horas:

$$\sum_{i=1}^m T_i \cdot C_{i,j} \leq 36 \quad (j = 1, 2, \dots, n)$$

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

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

- Cada lote deve ter no máximo 5 cilindros:

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

Para resolver este modelo, foi utilizado o Solver do Excel.

5. DEFINIÇÃO DO MODELO FORMAL

Os componentes do modelo descritos anteriormente são as máquinas-ferramenta, os fornos e os cilindros. Como ilustração do trabalho realizado serão apresentados somente os setores de usinagem e tratamento térmico, supondo que os setores de lingotamento e de forjamento irão garantir o abastecimento da linha.

Como efeito de simplificação, considerar-se-á que as máquinas estarão sempre ocupadas por pelo menos um operário, não havendo nenhuma máquina fora de operação. Através da observação e acompanhamento do processo e de seu histórico, é possível afirmar que tais hipóteses são aceitáveis.

Para facilitar o entendimento, o Modelo Formal será apresentado inicialmente sem muitos detalhes, sendo mostrados apenas os submodelos que o compõem (Figura 4); a seguir, será apresentado, a título de exemplo, o submodelo Preparação para Tratamento Térmico (Figura 5).

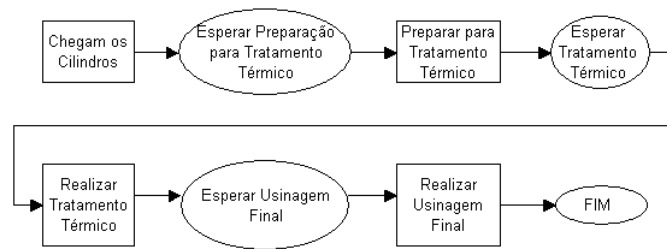


Figura 4 – Modelo Formal das Fases Fundamentais do Processo (Fonte: os autores)

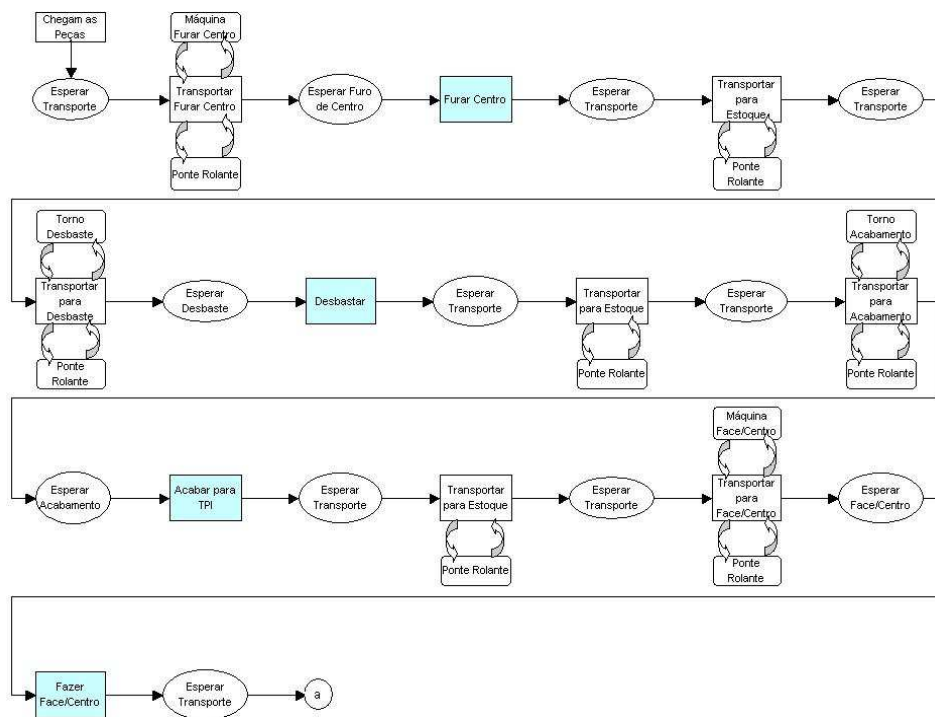


Figura 5 – Modelo Formal para a Fase de Preparação para Tratamento Térmico (Fonte: os autores)

6. MODELAGEM DO CENÁRIO USANDO ARENA®

A modelagem do cenário, utilizando a configuração de blocos ou módulos do Arena □ versão 10, é comentada a seguir:

- Foi modelado o setor da usinagem (Figura 8) utilizando os recursos de programação do Arena ® tendo como base o trabalho realizado anteriormente pelos autores de otimização que utilizou a PLI - Programação Linear Inteira (Hillier & Lieberman, 2001) e com base nos conceitos da Teoria das Restrições (TOC – Theory of Constraints), proposta por Eli Goldratt (Blackstone, 2001), na análise do fluxo de processo. O trabalho realizado de otimização leva em consideração as restrições do sistema produtivo (tempo do torno de acabamento, capacidade de geração de metal líquido, temperatura de tratamento térmico, tipo de lingoteira) através desta análise foi possível determinar qual é a melhor seqüência para o “nascimento” dos cilindros utilizando a PLI.
- Os dados de entrada são os resultados do modelo de PLI que levou em consideração as restrições do sistema conforme Tabela 1 (Os dados que estão representados por letras não podem ser apresentados por motivo de confidencialidade).

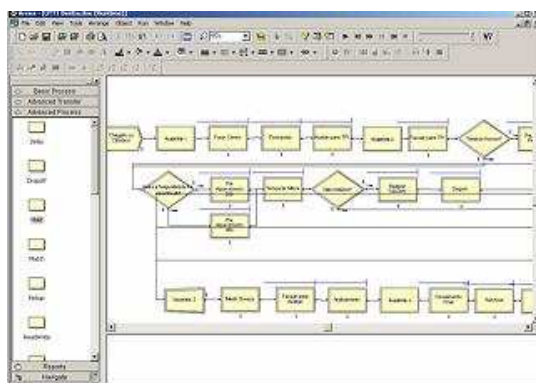


Figura 8 – Modelagem através do Arena ®

Tabela 1 – Dados de entrada Tabela 1 do Arena ® (Fonte: os autores)

Cilindro	OV	Temperatura Pré-Aquecimento (C)	Temperatura Revenimento (C)	Temperar Pescoço (C)	Sub Zero (C)	Furar (h)	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	-60	1,5	8	4	1
59219	412503	B	Z	0	-60	1,5	8	4	1
63227	413129	A	X	Y	-90	1,5	8	3	1
59220	412503	B	Z	0	-60	1,5	7	4	1
59221	412503	B	Z	0	-60	1,5	8	4	1
Cilindro	OV	Temperar Mesa (h)	Degelo (h)	Revenir (h)	Face/ Centro (h)	Acabamento (h)	Face/ Centro (h)	Retificar (h)	Fresar (h)
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

7. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Através do modelo de PLI conseguiu-se um melhor agrupamento dos cilindros com características semelhantes, o que 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 (Figura 7).

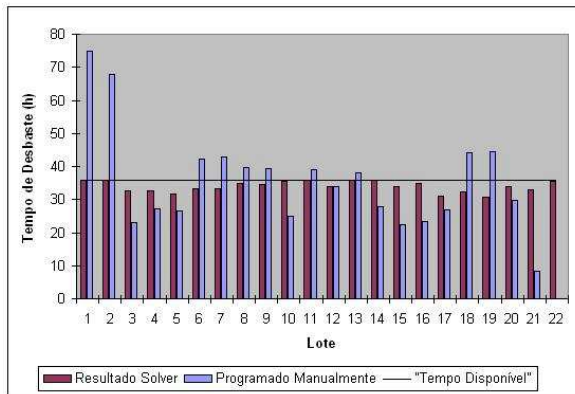


Figura 7 - Tempos de desbaste por lote obtidos pelo Solver e manualmente (Fonte: os autores)

Por meio da simulação foi possível determinar, para o mix de produção existente, a capacidade média mensal, o tamanho da fila e a ocupação dos equipamentos. A Tabela 2 mostra um exemplo dos indicadores que podem ser obtidos através da simulação e que são gerados pelo Arena sempre que o programa é executado.

Tabela 2 – Indicadores chaves de ocupação/filas (Fonte: saída dos resultados do Arena)

Key Performance Indicators			
System	Average		
Number Out	126		
Queue	Waiting Time		
	Average	Minimum Value	Maximum Value
Desbastar Queue	110.58	37.0469	202.24
Faceamento Final Queue	1.9159	0.00	12.4400
Facear para Acabar Queue	4.1791	0.00	14.9340
Facear para TPI Queue	2.2663	0.00	13.8040
Fresar Queue	0.1244	0.00	3.0000
Furar Centro Queue	1.8333	0.00	10.5655
Pre Aquecimento 280 Queue	8.6512	0.00	37.6400
Usage	Scheduled Utilization		
	Value		
Caixa de Degelo	0.7235		
Caixa de SubZero	0.7276		
Estufa Maior	0.5649		
Estufa Menor	0.5442		
Forno de Pre Aquecimento	0.8096		
Forno de Pre Aquecimento 45	0.8004		
Forno de Reaquecimento	0.5254		
Fresadora	0.7812		
Mandriadora	0.6881		
Retífica	0.8463		
Torno de Acabamento	0.9297		
Torno de Desbaste	0.9240		
Torno de Faceamento	0.6682		

Utilizando o modelo de simulação criado foi possível, também, definir o melhor momento em que cada cilindro deveria passar pelos tornos de acabamento, conforme a Tabela 3. Seguindo-se a seqüência gerada por esta tabela, houve um melhor controle do abastecimento do tratamento térmico e das retíficas, o que evitou o desabastecimento dos equipamentos e garantiu um fluxo contínuo de produção. Estas mudanças tornaram o processo mais enxuto; além disso, houve um maior grau de acerto no cumprimento do prazo, o que implicou num melhor atendimento ao cliente, como pode ser visto na Tabela 4.

Tabela 3 – Fluxo de produção do gargalo (Fonte: os autores)

Nº do Cilindro	Ir Para
50591	Tratamento Térmico
50931	Tratamento Térmico
40660	Tratamento Térmico
54834	Tratamento Térmico
54835	Tratamento Térmico
63227	Acabamento
59218	Acabamento
59219	Acabamento
54996	Tratamento Térmico
59220	Acabamento
59221	Acabamento
51252	Acabamento
54997	Tratamento Térmico

Tabela 4 – Acerto na data de remessa dos cilindros (Fonte: autor)

	Mês	Acerto (%)	Acerto (quantidade de cilindros)
Antes da implementação	abr-07	70	91
	mai-07	73	95
	jun-07	71	92
Após a implementação	ago-07	89	116
	set-07	92	120

8. CONCLUSÃO

Este trabalho visou à redução dos tempos mortos com um aumento da produtividade da área analisada. Com a aplicação do método exposto, os resultados obtidos foram satisfatórios, pois com um melhor gerenciamento do gargalo foi possível prever, com maior exatidão, o fluxo da produção, garantindo um fluxo contínuo e uma melhor previsibilidade do acerto do prazo 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. Também com os resultados da simulação será possível propor melhorias com os grupos de Kaizen.

Como pode ser verificado na Tabela 4, o acerto da data final de produção (data de remessa) passou de 70% para acima de 90%. Esta melhoria na assertividade da data final do produto facilita o fluxo logístico de entrega do produto ao cliente final, pois 80% da produção destina-se ao mercado externo, sendo possível realizar a reserva dos navios (95% da produção utiliza a modalidade marítima para a exportação) com uma maior antecedência do que realizada anteriormente.

Além dos ganhos acima citados, a aplicação da simulação ajudou a planejar a gestão da produção antes dela ser executada, trazendo novos insights, o que contribuirá para o melhor entendimento dos problemas que possam 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 programação linear inteira e da simulação, conforme apresentado neste trabalho, é uma forma eficaz para se obter um melhor planejamento da produção com uma melhor previsibilidade dos prazos de entrega e, conseqüentemente, um melhor atendimento ao cliente.

Agradecimentos a Aços Villares e todos os funcionários da área de planejamento, engenharia e da produção pela valorosa colaboração em ceder os dados utilizados neste trabalho.

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Arenales, M., Armentano, V., Morabito, R., Yanasse, H. **Pesquisa Operacional - Modelagem e Algoritmos**, Campus-ABEPRO, Rio de Janeiro, Elsevier, 2007.
- [2] Banks, J., Carson, J. S., Nelson, B. L., Nicol, David M. **Discrete-event system simulation**.3 ed. Prentice-Hall, New Jersey, 2000.
- [3] Bateman, R. E., Bowden, Royce O. **Simulação Otimizando os Sistemas**. 2 ed. Ed. Imam, 2002.

- [4] Blackstone, J. H. **Theory of Constraints – a status report**, International Journal of Production Research, 2001, vol. 39, n. 6, pp. 1053-1080.
- [5] Corrêa, H. L., Corrêa, C. A. **Administração de produção e operação**. 2 ed. Ed. Atlas, 2006.
- [6] Fleury, P. F., Wanke, P., Figueiredo, K. F. **Logística Empresarial – A perspectiva brasileira**, 1 ed., Ed. Atlas, 2000.
- [7] Goldbarg, M., Luna, H. **Otimização combinatória e programação linear: modelos e algoritmos**. 1 ed., Ed. Campus, 2000.
- [8] Hillier, F. S., Lieberman, G. J. **Introduction to Operations Research – 7th edition**, McGraw Hill, 2001.
- [9] Lachtermacher, G. **Pesquisa Operacional na Tomada de Decisões**. Editora Campus, Rio de Janeiro, 2004.
- [10] Law, A., Kelton, W. D. **Simulation Modeling and Analysis**, 2nd ed. McGraw-Hill, USA, 1991.
- [11] Mihram, D., Mihram, G. A. **Human Knowledge, the role of models, metaphors and analogy**, International Journal of General Systems, 1974, vol.1, n.1, pp. 41-60.
- [12] Mitroff, I.I.;Betz, F.; Pondy, L.R.; Sagasti, F. (1974). **On managing science in the systems age: two schemas for the study of science as a whole systems phenomenon**. Interfaces, Vol. 4,No. 3, pp. 46-58.
- [13] Oliveira,F. A., Duarte, R. N., Montevechi, J. A. B. **O reflexo da mudança organizacional sobre o desempenho de uma empresa de autopeças: estudo de caso**. In: Encontro Nacional de Engenharia de Produção,22, 2002, Curitiba. Anais...Curitiba: PUC-PR, 2002.
- [14] Papadopoulos, H. T., Heavey, C., Browne, J. **Queueing Theory in Manufacturing Systems Analysis and Design**. 1st. ed. London: Chapman & Hall,1993.