

RF-899

## THEORY OF CONSTRAINTS SOFTWARE FOR LEAN PRODUCTION IMPLEMENTATIONS: AN INNOVATION

Rogério Cerávolo Calia (Fundação Getúlio Vargas, São Paulo, Brasil) - [calia@gvmail.br](mailto:calia@gvmail.br)  
José Carlos Barbieri (Fundação Getúlio Vargas, São Paulo, Brasil) - [jcbarbieri@fgvsp.br](mailto:jcbarbieri@fgvsp.br)

Compared to mass production, Lean Production increased competitiveness in the automotive industry, by enabling more quality with fewer resources. However, it is difficult to implement Lean Production in manufacturing environments with high demand variability, big product variety, numerous production down times or production capacity constraint. This theoretical paper aims to define hypothesis about the feasibility to implement Lean Production in complex manufacturing environments, by means of the software for production planning and control with Theory of Constraints' algorithms. The paper reviews concepts about innovation, Lean Production evolution, the challenges of implementing Lean manufacturing in complex manufacturing environments and the Theory of Constraints algorithms. Then, an interview with a production planner is presented, who implemented Lean Production with the Theory of Constraints software. Finally, hypothesis to be validated in future researches are proposed.

Keywords: Lean Production, Theory of Constraints software, complex manufactures, production planning and control, innovation.

## SOFTWARE DE TEORIA DAS RESTRIÇÕES PARA AS IMPLEMENTAÇÕES DE PRODUÇÃO ENXUTA: UMA INOVAÇÃO

Em relação à produção em massa, a Produção Enxuta aumentou a competitividade do setor automobilístico por aumentar qualidade com menos recursos. No entanto, é difícil implementar a Produção Enxuta em ambientes com elevada variação de demanda, grande variedade de produtos, muitas paradas imprevistas ou restrição de capacidade de produção. Este artigo teórico visa delinear hipóteses sobre a viabilização da implementação da Produção Enxuta em ambientes complexos de manufatura, por meio de software de planejamento e controle de produção com algoritmos da Teoria das Restrições. O artigo revisa conceitos sobre inovação, a evolução da Produção Enxuta, os desafios de implementar Produção Enxuta e os algoritmos da Teoria das Restrições. Em seguida, é apresentada um entrevista com um planejador de produção que implementou a Produção Enxuta com um software de Teoria das Restrições. Por fim, são propostas hipóteses para serem testadas em pesquisas futuras.

Palavras-chave: Produção Enxuta, software de Teoria das Restrições, manufaturas complexas, planejamento e controle da produção, inovação.

## 1 INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA

A Produção Enxuta é uma metodologia de gestão com ampla difusão entre as manufaturas no Brasil e no mundo, propondo que o paradigma de produção em massa seja substituído por um novo paradigma que utilize menos esforço humano, menos espaço, menos capital e menos tempo para fabricar produtos com menos defeitos (THE LEAN ENTERPRISE INSTITUTE, 2003).

A origem e a demonstração da viabilidade deste paradigma da Produção Enxuta é mérito da Toyota, a qual em 1990, produzia automóveis com metade do esforço humano, metade do espaço para produção, metade dos investimentos, menores tempos para produzir os seus produtos e menores tempos de desenvolvimento de novos produtos em relação aos fabricantes de automóveis que adotavam o paradigma de produção em massa (WOMACK et al., 1992).

Um dos pilares do Sistema Toyota de Produção é o planejamento e controle da produção pelo sistema *just-in-time*, o qual visa a minimização de estoques por meio da produção puxada (THE LEAN ENTERPRISE INSTITUTE, 2003).

Em contraposição à produção empurrada (que utiliza grandes lotes de produção com base em previsões de demanda sem levar em conta as variações reais no ritmo de trabalho das etapas do processo), a produção puxada é um método de controle da produção, no qual as atividades mais próximas da demanda avisam as atividades anteriores sobre as suas necessidades (THE LEAN ENTERPRISE INSTITUTE, 2003).

No entanto, um sistema *just-in-time* requer alguns pré-requisitos, como por exemplo:

- a) A confiabilidade, pois é muito difícil atingir um fluxo rápido, se o fornecimento de componentes e a disponibilidade de equipamentos não forem confiáveis, gerando paradas imprevistas na produção (SLACK, 2002) e
- b) a disponibilidade de capacidade de produção para que as etapas do processo produzam no momento exato, conforme demandado pelo fluxo de valor (WOMACK, 2003).

Nas manufaturas da subsidiária brasileira de uma multinacional inovadora, as implementações de Produção Enxuta se depararam com dificuldades ao adotar a produção puxada e o sistema *just-in-time*, devido à ocorrência de muitas paradas imprevistas de produção, grande diversidade de produtos, elevada variabilidade de demanda e gargalo de produção. Neste ambiente complexo de manufatura, foi implementado um software com algoritmos da Teoria das Restrições (GOLDRATT, 2002) para o planejamento e controle da produção sinergicamente com o Mapeamento do Fluxo de Valor, kanbans, quadro Heijunka, gestão visual e demais metodologias da Produção Enxuta (CALIA, 2005; CALIA e GUERRINI, 2005; CALIA e MOURA, 2006; CALIA e GUERRINI, 2005).

O artigo busca bases conceituais na literatura acadêmica a fim de delinear hipóteses para pesquisas futuras com o objetivo de validar se as implementações de Produção Enxuta são facilitadas ou não pela utilização do software com algoritmos de Teoria das Restrições.

## 2 CONTEXTUALIZAÇÃO CONCEITUAL

Para contextualizar a busca de hipóteses, serão revisadas algumas pesquisas seminais e outras mais recentes sobre a gestão da inovação de processos, o desenvolvimento da Produção Enxuta como uma evolução de constantes inovações, os desafios de implementar a Produção Enxuta em ambientes complexos de manufatura e os modos pelos quais o software com algoritmos da Teoria das Restrições procura facilitar a produção puxada mesmo em ambientes complexos de manufatura.

## 2.1 Inovação

Para Schumpeter, os avanços tecnológicos representam o principal determinante do desenvolvimento econômico, através do processo de “destruição criadora”, no qual a inovação “revolucionaria incessantemente a estrutura econômica a partir de dentro” (SCHUMPETER, 1942. p.121).

Na literatura científica, o termo “inovação” tem um sentido bem mais preciso do que o sentido que o senso comum atribui à palavra “inovação”. Freeman diferencia claramente “inovação” de “invenção”: invenção é a idéia ou modelo para a melhoria em um produto, equipamento processo ou sistema. Por outro lado, uma inovação, no sentido econômico, ocorre apenas após a primeira transação comercial resultante do novo produto, equipamento, processo ou sistema (FREEMAN, 1982).

Schumpeter (1961) analisa as diversas fases da inovação, desde a invenção até a inovação propriamente dita entendida como o desenvolvimento que viabiliza as primeiras explorações comerciais desta invenção aperfeiçoada. Por fim, ocorre a fase da difusão, ou seja, a fase da propagação dos novos produtos e processos pelos mercados potenciais.

A Inovação Tecnológica de Produto e Processo consiste da implementação de uma nova tecnologia ou significativa melhoria tecnológica no mercado (inovação em produtos) ou no processo produtivo (inovação em processos). Sendo que a Inovação Tecnológica de Produto e Processo envolve uma série de atividades científicas, tecnológicas, organizacionais, financeiras e comerciais (OECD, 1997).

No Manual de Oslo, referência internacional sobre a gestão da inovação elaborada pela OECD a inovação de processo é definida precisamente:

*“Uma inovação de processo tecnológico é a implantação/adoção de métodos de produção ou comercialização novos ou significativamente aprimorados. Ela pode envolver mudanças de equipamento, recursos humanos, métodos de trabalho ou uma combinação destes.”*

OECD, 1997

Deste modo, a inovação não se limita à criação de novos produtos, pois o esforço para gerar inovações na empresa, pode se configurar também na criação de novos serviços ou na melhoria dos processos organizacionais internos (CHRISTENSEN, 2004). Portanto, a melhoria do desempenho de uma manufatura, por meio da implementação de uma nova metodologia de gestão se caracteriza como um fenômeno de inovação. Com isso, a implementação de uma metodologia de gestão, como a Produção Enxuta e a Teoria das Restrições, deve ser passível de ser explicada pelas teorias de inovação.

De fato, para os autores do Manual de Oslo, a implementação do *just-in-time* é caracterizada como uma inovação de processo, por impactar diretamente o modo de produção de produtos para o mercado.

## 2.2 O Desenvolvimento da Produção Enxuta

O desenvolvimento da Produção Enxuta no Japão no pós-guerra é marcado por numerosas inovações em metodologias de gestão pela combinação e modificação de técnicas advindas de diferentes países e diferentes setores econômicos. De modo semelhante, a adoção das técnicas da Produção Enxuta nas empresas ocidentais, também contou com várias inovações e complementações na década de 80 e, com maior intensidade, a partir de 1990.

A Produção Enxuta (Womack et al., 1992) é um sistema integrado de múltiplas práticas de gestão, incluindo *just in time*, controles de qualidade, times de trabalho, células de manufatura, gestão de fornecedores (Shah e Ward, 2002) e o Mapa do Fluxo de Valor (Rother e Shook, 1999).

O termo “Produção Enxuta” foi popularizado, por meio do livro “A Máquina que Mudou o Mundo”, uma obra resultante de um extenso programa de pesquisa do MIT sobre a competitividade do setor automobilístico mundialmente, o “*International Motor Vehicle Program*” (WOMACK et al, 1992).

Neste livro, os autores reconhecem que a Toyota foi a empresa pioneira nos conceitos da Produção Enxuta (WOMACK et al, 1992). De fato, a Toyota foi obrigada a procurar por paradigmas de produção alternativos ao paradigma vigente de produção em massa devido ao ambiente econômico recessivo no Japão nos anos seguintes à segunda guerra mundial e devido ao tamanho reduzido do mercado Japonês, no qual a produção anual de automóveis era equivalente a apenas três dias de produção de carros nos EUA (HOLWEG, 2007).

Neste ambiente, a Toyota adotou e adaptou seletivamente metodologias de produção automobilísticas norte-americanas, integrando-as com técnicas da indústria têxtil japonesa e com as suas próprias inovações para gerar técnicas seminais de Produção Enxuta. Este longo processo de inovação percorreu por várias décadas (FUJIMOTO, 1999).

*“O sistema no estilo Toyota não foi nem puramente original, nem totalmente imitativo. Ele é essencialmente um híbrido.”* (FUJIMOTO, 1999).

As metodologias de produção da Toyota só foram documentadas formalmente em 1965, quando a empresa decidiu difundir-las aos seus fornecedores. Além disso, o que deflagrou maior notoriedade ao Sistema Toyota de Produção foi a primeira crise do petróleo em 1973 (HOLWEG, 2007).

Schonberger, o autor do conhecido livro *World Class Manufacturing* (SCHONBERGER, 1986) realizou uma pesquisa recente para avaliar em que medida as empresas conseguem manter o desempenho enxuto. Utilizando séries temporais de quinze anos para o giro de estoque de 1200 empresas em 32 países e 35 setores econômicos, o autor classificou tendências na evolução do giro de estoque (SCHONBERGER, 2007).

Surpreendentemente, a Toyota foi classificada na posição 52 em um *ranking* com 54 posições, pois o giro de inventário desta empresa caiu pela metade nos últimos 12 anos de 22,9 para 11,1 giros (SCHONBERGER, 2007).

Provavelmente, essa tendência decrescente nos giros de inventário da Toyota se deve à sua expansão global. De fato, a empresa Toyota desenvolveu as suas metodologias de gestão num município da região de Aichi no Japão também denominado Toyota, onde se concentravam numerosos fornecedores, de modo que a empresa era conhecida como a montadora com a maior concentração geográfica de suas operações. Ao crescer globalmente, a Toyota parece ter enfrentado dificuldades em manter o desempenho de seu modelo inicial (SCHONBERGER, 2007).

Além disso, as empresas japonesas em geral tiveram o pior desempenho nas métricas de tendência de longo prazo na evolução de giro de inventário, quando comparadas às empresas européias e norte-americanas (SCHONBERGER, 2007).

Essas evidências sugerem que as empresas criadoras do Sistema Japonês de Produção, apesar de terem obtido significativos resultados nas primeiras décadas de evolução das respectivas metodologias, não têm tido facilidade de manter seu desempenho no longo prazo (SCHONBERGER, 2007).

Além disso, os dados desta pesquisa indicam que, a partir de 1990, o Sistema Japonês de Produção se torna mais efetivo e sustentável, quando integrado a inovações ocidentais complementares, como, por exemplo, a produção modular, a reengenharia, o VMI (Vendor-Managed Inventory), entre outras (SCHONBERGER, 2007).

Em suma, a gestão da inovação foi chave para a evolução da Produção Enxuta, tanto no período em que foi criada no Japão, como no período recente, no qual a Produção Enxuta é implementada de modo integrado a inovações ocidentais recentes.

O presente artigo pretende dar uma contribuição adicional a este processo evolutivo da Produção Enxuta, ao buscar identificar meios para aumentar a sua aplicabilidade em ambientes complexos de manufatura.

### **2.3 Desafios às Implementações de Produção Enxuta**

Alguns fatores dificultam a aplicabilidade da Produção Enxuta, como a restrição de capacidade, baixa confiabilidade da produção, elevada variedade de produtos e variações de demanda.

Para Womack (2003), as demandas do fluxo de valor requerem que as etapas do processo possam produzir os pedidos no momento certo, o que por sua vez, implica na disponibilidade de capacidade de produção. Portanto, nos casos em que a demanda exceder à capacidade de produção, é necessário gerenciar as restrições para atender ao fluxo de valor.

Outro fator necessário à implementação da Produção Enxuta é a baixa ocorrência de paradas imprevistas por motivos como a falta de materiais ou a quebra de equipamentos, a fim de viabilizar o rápido fluxo de produção (SLACK, 2002).

Quanto à variedade de produtos, as pesquisas do MIT para o setor automobilístico indicam que manufaturas geridas pela Produção Enxuta são mais eficientes para fabricar maior variedade de produtos do que manufaturas que adotam o paradigma da produção em massa (MACDUFFIE et al, 1996). No entanto, na perspectiva de setores com variedade de produtos bem superior à do setor automobilístico, como o setor eletroeletrônico, por exemplo, são observadas diversas barreiras organizacionais e tecnológicas às implementações da Produção Enxuta (JINA et al, 1997; BENNETT e FORRESTER, 1994).

Além disso, as variações de demanda podem criar dificuldades às implementações da Produção Enxuta. De fato, no atual cenário de economia recessiva no Japão, foram observadas dificuldades de manter a aplicabilidade da Produção Enxuta em quatro empresas japonesas devido às alterações de demanda (KATAYAMA e BENNETT, 1996). De modo semelhante, em uma empresa aeroespacial, muitos dos métodos da Produção Enxuta não se comprovaram tão eficientes como na indústria automotiva devido a diferentes características da demanda (BAMBER e DALE, 2000).

O tipo de manufatura também é um fator que pode gerar dificuldades às implementações de Produção Enxuta. Na indústria siderúrgica, Abdulmalek e Rajgopal (2007) descobriram que metodologias da Produção Enxuta como a redução de tempo de troca de máquina, *just-in-time*, nivelamento da produção e manutenção produtiva total têm aplicabilidade limitada, pois os autores consideram que estas técnicas são passíveis de adaptação apenas parcial nas manufaturas de processos.

Além disso, o sucesso da implementação de técnicas da Produção Enxuta pode depender de fatores contextuais como o grau de sindicalização e o tamanho da empresa, sendo que

fábricas grandes são mais propensas a implementar um maior número de práticas de Produção Enxuta se comparadas com as fábricas pequenas (SHAH e WARD, 2003). Outro fator relevante que influencia as implementações de Produção Enxuta é o conjunto de técnicas de Produção Enxuta que são implementadas. Uma pesquisa empírica recente realizada por Shah e Ward (2007) concluiu que são a complementaridade e os efeitos sinérgicos de dez elementos diferentes e inter-relacionados da Produção Enxuta que proporcionam a habilidade de se atingir múltiplas metas de desempenho. Esta pesquisa identificou que os principais elementos de uma sólida implementação de Produção Enxuta são: produção puxada, comunicação com o fornecedor, fornecimento JIT pelos fornecedores, desenvolvimento de fornecedores, envolvimento de clientes, fluxo contínuo, redução do tempo de troca de máquina, manutenção produtiva ou preventiva total, controle estatístico do processo e envolvimento de funcionários.

#### **2.4 Software com os Algoritmos da Teoria das Restrições para o Planejamento e Controle da Produção**

Os algoritmos da Teoria das Restrições foram criados para viabilizar a produção puxada mesmo em ambientes de manufatura caracterizados por variações de demanda, restrição de capacidade de produção, paradas imprevistas e grande variedade de produtos (GOLDRATT, 1991).

A Teoria das Restrições foi criada pelo físico israelense, Eliyahu Goldratt. Após concluir o seu doutorado sobre otimização de fluxo de líquidos e obter patentes neste campo, Goldratt se dedicou a resolver problemas de programação de produção em uma fábrica. Para otimizar o atendimento de pedidos no prazo, aumentar a produtividade e diminuir os estoques, Goldratt elaborou um método de programação da produção e fundou uma empresa para comercializar o *Optimized Production Technology*, software criado para programar a produção de manufaturas. Alguns anos depois, escreveu o livro “A Meta” para divulgar sua metodologia de produção, o “*Drum-Buffer-Rope*” (GOLDRATT, 2002).

Os detalhes sobre o funcionamento dos algoritmos do Tambor-Pulmão-Corda (*Drum-Buffer-Rope*) foram publicados por Goldratt, quando ele decidiu focar no ensino da Teoria das Restrições e não mais no software de programação da produção. (GOLDRATT, 1991).

A implementação dos algoritmos de planejamento e controle da produção pela Teoria das Restrições contribui no aumento da competitividade da empresa em indicadores como atendimento de pedidos no prazo, tempo de fabricação e giro de estoque (CSILLAG e CORBETT, 1998).

Atualmente, no Brasil, duas empresas nacionais comercializam software de programação da produção com os algoritmos da Teoria das Restrições:

- a) A Linter Sistemas que criou o software denominado “Drummer APS”, o qual recebeu a certificação “TOC Compliant” do Dr. Goldratt, em 2002.
- b) E a Datasul que criou o software “Datasul APS – DBR”.

A seguir serão descritos os algoritmos e rotinas do Tambor-Pulmão-Corda (GOLDRATT, 1991):

##### **a) *Drum* (Tambor) – A Definição do Ritmo Viável de Produção**

A programação da produção pela Teoria das Restrições visa alinhar o ritmo de todo o fluxo de produção com o ritmo de vendas. Para isso, apenas um recurso ou um centro de trabalho é programado. Se a demanda for maior do que a capacidade, alguns pedidos não serão entregues no prazo e o volume de produção do fluxo de produção como um todo vai ser

determinado pelo recurso de menor capacidade, ou seja, pelo gargalo. Portanto, a seqüência de produção que irá maximizar a entrega de produtos no prazo deve ser definida no gargalo, de acordo com sua capacidade real. Tanto a liberação de materiais como a seqüência de produção dos recursos não-gargalo devem se subordinar à programação do gargalo. Deste modo, o recurso com restrição de capacidade deve ser o responsável pelo ritmo de todo o fluxo de produção. Ele é o *Drum* (tambor), numa analogia ao exército que marchava sincronizadamente pelo ritmo de um tambor. Caso a demanda seja menor que a capacidade, haverá ociosidade. Neste caso, o ritmo para o fluxo de produção como um todo deve ser dado pela seqüência da expedição.

b) *Buffer* (Tempo de Proteção ou “Pulmões”) - Imunização do Fluxo contra Paradas Imprevistas

Nem tudo ocorre conforme o planejado em uma fábrica. Os pedidos de produção podem atrasar por faltas de materiais ou embalagens, erro no sistema de informação, defeito de qualidade, falta de mão-de-obra, entre outros motivos. Além disso, os lotes de produção, as reprogramações e os “encaixes” de pedidos de última hora para clientes-chave são causas muito comuns para a fila de ordens de produção crescer demais e dificultar a gerenciabilidade do sistema. Apesar de não se saber o que dará errado, pode-se fazer um levantamento da freqüência e duração das paradas imprevistas durante os últimos meses e programar a liberação de materiais e o recurso com restrição de capacidade com um tempo de proteção dimensionado em função deste levantamento. Essa medida simples evita excesso de reprogramações.

c) *Rope* (Corda) – Limitação Controlada do Estoque em Processo

Para que a proteção de tempo seja formada, o programa da liberação de materiais deve ser subordinado ao programa da restrição e da expedição, sendo que está “amarração” entre os programas em diferentes pontos do fluxo é feita pela “Corda”. Assim, a seqüência da liberação de materiais respeita a capacidade do gargalo e, além disso, é antecipada pela duração dos Tempos de Proteção.

d) *Buffer Management* (Controle da Proteção de Tempo) – Gerenciamento das Exceções

As rotinas de Controle da Produção na Teoria das Restrições são realizadas pelo *Buffer Management*, que consiste do acompanhamento do *status* real da proteção de tempo de cada pedido e ordem de produção da linha de produtos. Na prática, o Controle da Proteção de Tempo oferece um claro critério de priorização e urgenciamento de produção em termos de risco de atraso. Uma segunda função do monitoramento do risco de atraso consiste na identificação das causas de consumo imprevisto da proteção de tempo. Essas causas são priorizadas para orientar o foco em projetos de melhoria para redução do tempo de suprimento (*lead-time*).

### 3. ENTREVISTAS

Foram realizadas duas entrevistas com o programador da produção da manufatura analisada que implementou Produção Enxuta sinergicamente com o software de programação e controle da produção pelos algoritmos de Teoria das Restrições. A primeira entrevista foi realizada em 2004 e a segunda entrevista, em dezembro de 2007.

A empresa analisada tem mais de cem anos de existência, desde a sua fundação nos EUA e atua no Brasil a mais de cinquenta anos. A empresa opera em mais de sessenta países e em cerca de quarenta mercados diferentes. Essa empresa conta com uma extensa linha de produtos e é reconhecida pela sua inovação.

Em 2004, a implementação do software de Teoria das Restrições tinha como finalidade a diminuição do valor de estoques.

Nesta implementação, o software de planejamento e controle de produção pela Teoria das Restrições foi implementado de forma sinérgica com o Mapa do Fluxo de Valor que é uma metodologia central da Produção Enxuta. O Mapa do Fluxo de Valor (SHOOK e ROTHER, 1999) definiu onde seriam colocados estoques de reabastecimento pelo real consumo, a frequência de reposição de estoques e a definição de projetos de melhoria para redução de tempo de preparação de máquina. O software de Teoria das Restrições viabilizou este projeto de Fluxo de Valor, por ser capaz não só de gerar as ordens de produção para um grande número de itens estocados, mas de seqüenciá-las pela capacidade da operação restritiva e de protegê-las com os tempos de proteção.

O time do projeto obteve os resultados desejados a partir de 45 dias de implementação. Esta rapidez na implementação foi beneficiada pelo fato da equipe da manufatura ter tido bom desempenho em experiências anteriores de conduzir inovações em metodologias de gestão. Com isso, essa equipe era favorável à mudança em seus processos de trabalho.

Após três meses de implementação, o valor de inventário do fluxo de produção como um todo (produtos acabados, material em processo e matéria-prima) foi reduzido em 45%. No entanto, esta redução de estoque não causou atrasos. Pelo contrário, concomitantemente à redução de inventário, observou-se uma melhoria no atendimento no prazo para produtos feitos contra pedidos (*make-to-order*) que passou de 93% para 98,6%.

Estes resultados ocorreram devido às seguintes mudanças nos procedimentos de planejamento e controle de produção: Produção “puxada” pela demanda real; sincronização da manufatura; e proteção de tempo no programa de produção.

O planejamento da produção passou a ser baseado no reabastecimento para a demanda real e não para as previsões de venda (que não tinham um índice de acerto satisfatório). Com isso, a programação da produção para os produtos estocados passou a ser regida por estoques do tipo “supermercado”, ou seja, estoques que só são reabastecidos pela operação fornecedora, quando o mercado efetivamente consome o produto até que o nível de estoque fique abaixo do ponto de reposição. Deste modo, os estoques do tipo “supermercado” puxam a programação das operações que fabricam os produtos estocados.

Outra mudança no processo de programação é que o fluxo de manufatura foi sincronizado. Isso significa que as operações não são programadas independentemente uma das outras, mas que se programa o fluxo de produção por inteiro, ao se programar apenas a operação com restrição de capacidade que passa a ditar o ritmo para as demais operações. Deste modo, as operações sem restrição de capacidade têm sua seqüência e seu ritmo de produção subordinados à seqüência e ritmo de produção da operação gargalo. Com isso, evita-se excesso de inventário em processo entre as operações e os materiais fluem mais rapidamente ao passar pelas operações.

Por um lado, a redução de inventário foi obtida pela programação puxada por estoques do tipo “supermercado” e pela sincronização da manufatura, por outro lado, a melhoria concomitante no percentual de atendimento a pedidos no prazo ocorreu devido à instituição de tempos de proteção (*time buffers*) contra os imprevistos que aleatoriamente causam paradas na produção e no atendimento a pedidos. Ou seja, cada pedido passou a ser liberado para a produção com uma certa antecedência de tempo parametrizada, de modo a se mudar o enfoque do controle da produção, que deixa de direcionar as ações corretivas para diminuir os problemas que já causaram os atrasos, para passar a executar ações corretivas antes que o atraso ocorra. Com isso, o controle da produção visualiza os pedidos e ordens de produção em termos de risco de atraso, o que proporciona um critério de priorização bastante claro e pragmático.

Em 2004, o planejador da produção foi entrevistado a fim de relatar quais foram os benefícios do software de Teoria das Restrições em sua manufatura durante a implementação da Produção Enxuta. Segundo ele, problemas que antes costumavam interromper a produção, agora não estão mais causando atraso e a fila de produtos não-estocados diminuiu.

Outro benefício observado, é que a fábrica agora consegue alocar melhor os operadores aos centros de trabalho. Os centros de trabalho priorizados são os que estiverem com maior risco de atraso, de acordo com os seus relatórios de controle. Estes relatórios mostram a priorização de pedidos conforme o estado da proteção de tempo (*time buffer*) para cada ordem de produção.

Além disso, a implementação do software de Teoria das Restrições obteve o significativo resultado de diminuir o tempo de fabricação de 12 para 6 dias, devido à melhoria no fluxo de materiais e no fluxo de informação na fábrica.

Esta implementação teve o seguinte desempenho cronologicamente:

- Redução de Estoque – Início da implementação em julho de 2003. Melhora de desempenho em 45 dias e estabilização do desempenho depois de três meses.
- Redução de Atrasos – Melhora e estabilização de desempenho depois de dois meses após o início da implementação.

Quatro anos depois foi realizada uma segunda entrevista com o mesmo planejador de produção em dezembro de 2007. Atualmente, a multinacional analisada já conta com cerca de dez manufaturas no Brasil que implementaram a Produção Enxuta com o software de Teoria das Restrições.

Na manufatura analisada foi observado o melhor giro de estoque, quando comparada com manufaturas da mesma empresa que produzem os mesmos produtos nos EUA, Alemanha, China e Japão.

Este desempenho foi obtido, apesar desta manufatura atuar em um ambiente de manufatura complexo por:

- Ter mais de 80% do faturamento representado por produtos feitos sob medida,
- produzir mais de 500 produtos finais ao mês,
- ter um crescimento de vendas de 30% em 2007
- e estar com restrições de capacidade na produção.

### 3 HIPÓTESES

Com base nesta revisão da literatura acadêmica e na entrevista é possível compor hipóteses para pesquisas futuras identificarem se a utilização do software com algoritmos de Teoria das Restrições melhora os resultados das implementações de Produção Enxuta em ambientes complexos de manufatura caracterizados por grande variedade de produtos, elevada variação de demanda, numerosas paradas imprevistas de produção ou restrição de capacidade de produção.

Portanto, a validação das hipóteses a seguir se presta para responder à seguinte pergunta de pesquisa: A implementação do software com algoritmos da Teoria das Restrições para o planejamento e controle da produção favorece a eficácia das implementações de Produção Enxuta em ambientes complexos de manufatura?

Hipótese 1 – A implementação do software com algoritmos da Teoria das Restrições para a programação e controle da produção facilita a implementação da Produção Enxuta em manufaturas com grande diversidade de produtos.

Hipótese 2 – A implementação do software com algoritmos da Teoria das Restrições para a programação e controle da produção facilita a implementação da Produção Enxuta em manufaturas com grande variabilidade de demanda.

Hipótese 3 – A implementação do software com algoritmos da Teoria das Restrições para a programação e controle da produção facilita a implementação da Produção Enxuta em manufaturas com muitas paradas imprevistas de produção.

Hipótese 4 – A implementação do software com algoritmos da Teoria das Restrições para a programação e controle da produção facilita a implementação da Produção Enxuta em manufaturas com restrição de capacidade de produção.

Pesquisas futuras podem validar as hipóteses acima, por meio de testes estatísticos para as seguintes variáveis:

- a) Variáveis dependentes – Percentual de melhoria no atendimento de pedidos no prazo, percentual de melhoria no giro de estoque, percentual de diminuição no tempo de produção e duração dos projetos que realizaram tais melhorias.
  - b) Variável independente – Utilização do software com algoritmos da Teoria das Restrições para o planejamento e controle da produção.
  - c) Variáveis de controle – Variedade de produtos, variabilidade de demanda, paradas imprevistas de produção, restrição de capacidade de produção, tamanho da fábrica, número de metodologias da Produção Enxuta adotadas, grau de sindicalização e disponibilidade de gerente de projetos para a implementação da Produção Enxuta e da Teoria das Restrições.
- a) Levantamento, na literatura acadêmica, sobre as estratégias internacionais (em periódicos como o *Journal of International Business Studies*, *Management International Review*, *International Business Review*, *Journal of World Business* e nas Revistas de Administração da USP e da FGV);
  - b) levantamento das perspectivas de inovações tecnológicas no setor do etanol com especialistas do setor (ESALQ-USP, EMBRAPA, IPT, CTC, UNICA, entre outros).
  - c) priorização das estratégias internacionais e das perspectivas de inovações
  - d) elaborar um roteiro para entrevistar especialistas em tecnologia de informação, especialistas em estratégia internacional e especialistas em inovação tanto das universidades (USP, FGV, UNICAMP, COPPEAD-UFRJ, entre outras), como de câmeras de comércio (alemã, americana, japonesa, entre outras) e de associações ligadas ao setor de negócios do etanol.
  - e) Elaboração de análises estatísticas (de agrupamento, de fatores, regressão múltipla entre outras) para se identificar os futuros desafios à gestão de tecnologia de informação para as organizações do setor do etanol combustível brasileiro serem competitivas no mercado internacional.

**REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- ABDULMALEK, F. A.; RAJGOPA, J. Analyzing the benefits of lean manufacturing and value stream mapping via simulation: A process sector case study. *International Journal of Production Economics*. Volume 107, Issue 1, Pages 223-236, 2007.
- ANTOLIN, M. N. Bases para el estudio del proceso de innovación tecnológica en la empresa. Universidade de Leon, México, 2001.
- BAMBER, L.; DALE, B. G.. Lean production: a study of application in a traditional manufacturing environment. *Production Planning and Control*, Volume 11, Number 3, 1 April, pp. 291-298(8), 2000.
- BENNETT, D.; FORRESTER, P. Product Variety and Just-in-Time: Conflict and Challenge, *The International Journal of Logistics Management*, 5, (1).pp. 73-80, 1994.
- CALIA, R. C. Modelo de Redes de Inovação para uma Metodologia de Gestão: Implementações de Teoria das Restrições. Texto de Dissertação (Mestrado). – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.
- CALIA, R. C.; GUERRINI, F. M. Projeto Seis Sigma para a Implementação de Software de Programação. *Rev. Produção*, v. 15, n. 3, p. 322-333, 2005
- CALIA, R. C.; GUERRINI, F. M. Waste reduction and capacity protection: a case study of combining lean manufacturing with theory of constraints. In: EurOMA, 2005, Budapest. Operations and Global Competitiveness. Budapest : Krisztina Demeter, 2005.
- CHRISTENSEN, C. M.; ANTHONY, S. D.; ROTH, E. A. Seeing what's next: using theories of innovation to predict industry change. Harvard Business School Press. Cambridge. Mass., 2004.
- CSILLAG, J.M.; CORBETT, T. Projeto de pesquisa de utilização da teoria das restrições no ambiente de manufatura em empresas no Brasil. Núcleo de Pesquisas e Publicações – FGV, São Paulo, 1998.
- FREEMAN, C. The economics of industrial innovation. London: Frances Pinter, 1982.
- FUJIMOTO, T. The Evolution of a Manufacturing System at Toyota. Oxford University Press, Oxford. 1999.
- GOLDRATT, E. The Haystack Syndrome: Sifting Information Out of the Data Ocean. North River Press, 1991.
- GOLDRATT, E.; COX, J. A Meta: Um Processo de Melhoria Contínua. Nobel, 2002.
- HAIR, J. et al. Análise Multivariada de Dados. 5ª ed. Porto Alegre: Bookman, 2005.
- HOLWEG, M. The genealogy of lean production. *Journal of Operations Management* 25 420–437, 2007.
- JINA, J.; BHATTACHARYA, A.; A. WALTON, A. Applying lean principles for high product variety and low volumes: some issues and propositions, *Logistics Information Management*, 10, 1, 5-13, 1997.
- KATAYAMA, H.; BENNETT, D.J., Lean production in a changing competitive world: A Japanese perspective. *International Journal of Operations and Production Management* 16 (2) 8-23, 1996.
- MACDUFFIE, J. P.; SETHURAMAN, K.; FISCHER, M. L. Product Variety and Manufacturing Performance: Evidence from the International Automotive Assembly Plant Study. *Management Science*, Vol. 42, No. 3 (Mar.), pp. 350-369. 1996.

- MALHORTA, N. K. Pesquisa de Marketing: Uma Orientação Aplicada. Porto Alegre. Bookman, 2001.
- NONAKA, I.; TAKEUCHI, H., Criação de Conhecimento na Empresa. Editora Campus, 1997.
- OECD, Oslo Manual: Proposed Guidelines for Collecting and Interpreting Technological Innovation Data. Organization for Economic Co-Operation and Development: Paris, 1997.
- ROTHER, M.; SHOOK, J. Aprendendo a enxergar - mapeando o fluxo de valor para agregar valor e eliminar o desperdício. São Paulo: Lean Institute Brasil, 1999.
- SCHONBERGER, R. Japanese production management: An evolution—With mixed success. *Journal of Operations Management* 25, 403–419, 2007.
- SCHONBERGER, R. World Class Manufacturing: The Lessons of Simplicity Applied. Free Press, New York, NY., 1986.
- SCHUMPETER, J. A. Capitalism, Socialism and Democracy Harper & Row, New York, 1942.
- SCHUMPETER, J. A. The theory of economic development. New York: Oxford University Press.1961.
- SHAH, R.; WARD, P.T. Lean manufacturing: context, practice bundles, and performance, *Journal of Operations Management*. 21 (2), pp. 129–149. 2003.
- SHAH, R.; WARD, P.T. Defining and developing measures of lean production, *Journal of Operations Management* (article in press, available online 20 January 2007).
- SLACK, N.; CHAMBERS, S.; HARRISON, A. Administração da Produção. Atlas. São Paulo, 2002.
- THE LEAN ENTERPRISE INSTITUTE. Léxico Lean – Glossário ilustrado para praticantes do Pensamento Lean. São Paulo: Lean Institute Brasil, 2003.
- WOMACK, J. Jim Womack on how Lean compares with Six Sigma, Re-engineering, TOC, TPM, etc. *Lean Enterprise Inst. Newsletter* (July 14), 2003.
- WOMACK, J.P.; JONES, D. T.; ROOS, D. A máquina que mudou o mundo. Rio de Janeiro, Campus, 1992.
- YIN, R. K. Estudo de Caso – Planejamento e Método. Porto Alegre, Bookman, 2005.