

# Capítulo IX

## TOC – Theory Of Constraints

### Teoria das Restrições

*“Theory of Constraints is that body of knowledge that deals with anything that limits an organization’s ability to achieve its goals” (Heizer and Render, 2000).*

## 1. Introdução

Muita atenção tem sido dada à teoria das restrições e a um sistema proprietário denominado OPT. O acrónimo OPT inicialmente estava associado a *Optimized Production Timetable* mas pouco depois passou a estar associado a *Optimized Production Technology*. A marca comercial OPT está associada por um lado ao conceito ou filosofia OPT, e por outro lado diz respeito a uma aplicação informática de programação da produção denominada OPT/SERVE. Este sistema criado pelo físico Israelita Eliyahu M. Goldratt controlava o fluxo da produção no sistema produtivo de forma muito pouco clara para os utilizadores acabando por vir a ser um fracasso de popularidade. Poucas empresas aderiram ao sistema e os princípios que regiam o sistema acabaram por dar lugar à Teoria das Restrições (TOC). Trata-se de uma filosofia de gestão da produção apresentada em alguns livros e artigos no final dos anos oitenta e no início dos anos noventa. Um dos livros mais famosos de Goldratt, relacionados com esta ideia de olhar para a produção é o famoso livro *The Goal*. É interessante notar que este livro não tem um formato técnico mas sim um formato de novela, muito fácil de ler. Esta filosofia baseia-se no pressuposto de que qualquer sistema produtivo é limitado por um ou mais factores (estrangulamentos). Segundo esta filosofia, o lucro máximo de uma empresa será obtido quando esses estrangulamentos (*bottleneck*) são usados na sua máxima eficiência. O termo Theory Of Constraints foi criado para designar a filosofia enquanto que o termo *Optimized Production Technology* está mais associado ao sistema informático de controlo da produção. Associada a esta filosofia está também uma técnica de programação da produção conhecida por “*Drum-Buffer-Rope*”.

Uma particularidade interessante, na minha opinião digna de nota, é que o principal autor desta filosofia (Goldratt) dá grande ênfase à importância do lucro. Esta ligação ao grande objectivo das empresas é muito interessante pois normalmente, as medidas de desempenho dos sistemas produtivos não estão relacionadas com as medidas de desempenho da empresa (sendo o lucro a principal)

## 2. Conceito de Estrangulamento

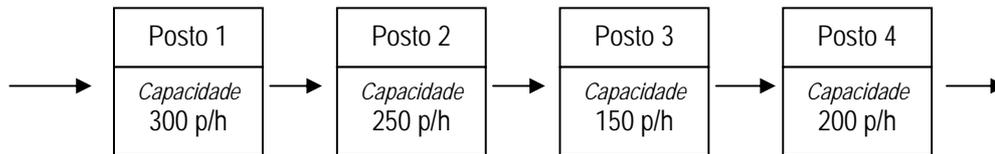
Goldratt, no seu livro “*The Goal*” apresenta, de forma algo metafórica, o exemplo de um grupo de escuteiro a fazer uma caminhada na montanha, indo de um ponto A para um ponto B. Como nem todos os escuteiros tem a mesma idade ou a mesma forma física, é natural que alguns vão ficando para trás enquanto que outros se vão distanciando cada vez mais para a frente no caminho. Ora como todos terão de estar no ponto B para que o objectivo seja alcançado (conclusão da caminhada), isso só é conseguido quando o escuteiro mais lento chegue ao ponto B. Não importa quão rápido é o escuteiro mais rápido pois isso em nada interfere no objectivo. O desempenho do grupo é ditado pelo desempenho do escuteiro mais lento. Este escuteiro é o nosso estrangulamento. Uma vez identificado o escuteiro mais lento há que tentar melhorar o seu desempenho. Qualquer ganho que se consiga na velocidade (desempenho) do escuteiro mais lento é um ganho de todo o grupo, esta é uma questão muito importante a reter.

Uma outra questão não menos importante está directamente ligada à ideia de que uma paragem de, digamos, 10 minutos do escuteiro mais lento representa uma paragem de 10 minutos de todos os outros escuteiros. Mesmo que todos os outros escuteiros continuem a andar, é o mesmo que estivessem parados. É interessante notar que para um observador externo, se todos os outros escuteiros continuassem a andar, é como se nada tivesse acontecido, não daria conta de que todo o sistema estava a perder 10 preciosos minutos de toda a jornada.

Como se pode melhorar o passo do escuteiro mais lento? Libertando-o da mochila por exemplo. A sua mochila pode passar a ser carregada por um escuteiro mais forte e mais rápido. Podemos também libertá-lo de outros itens que ele tem de carregar (cantil, casaco, etc.). Procurar todas as soluções possíveis para que ele se torne mais rápido. Pode acontecer que depois disto, este escuteiro deixe de ser o mais lento e nesse caso há que olhar para o novo “estrangulamento”.

A caminhada com os escuteiros é uma analogia com um sistema produtivo. Um exercício interessante neste momento é, perante essa analogia, identificar os recursos (máquinas), a taxa de produção, o inventário e o que produz cada recurso (máquina).

Vamos agora concentrar a atenção num sistema produtivo simplista com 4 postos de trabalho com o fluxo e taxas de produção apresentadas na figura 1.



**Figura 1 – Fluxo de produção de um hipotético sistema de produção.**

Para este sistema produtivo podemos, em teoria, tecer as seguintes considerações:

- Se a procura (do mercado) for de 100p/h (peças por hora), o sistema produtivo permite responder à procura.
- Se a procura for superior a 150 p/h então a linha tem um estrangulamento no posto 3
- Se a procura for superior a 200 p/h então a linha tem dois estrangulamentos: posto 3 e posto 4

A Teoria das Restrições (TOC – Theory Of Constraints) mostra que os estrangulamentos determinam por completo as regras e as condições de produção de um sistema produtivo.

O sistema produtivo da figura 1 pode apenas produzir à taxa do posto 3 (estrangulamento). Este posto 3 é o nosso “escuteiro mais lento” e cada hora que estiver parado é o mesmo que ter todo o sistema parado. Se por alguma razão o posto 3 passar a produzir à taxa de 120p/h então é como que todo o sistema passasse a produzir a essa taxa. É comum, numa grande parte das empresas que, mesmo com o estrangulamento parado se produza nos outros postos de trabalho. Desta forma tem-se a percepção de que se não está a perder tudo, mas na verdade, a única coisa que se está a fazer é aumentar os custos de inventário.

Uma vez identificado o estrangulamento é necessário protegê-lo. Atenção que identificar um estrangulamento nem sempre é tarefa fácil, voltaremos a este assunto mais tarde. Como se pode proteger um estrangulamento? Para proteger um estrangulamento teremos de ter em atenção várias vertentes:

- Há a questão da manutenção: um estrangulamento não pode avariar, por isso, o sistema de manutenção tem de dar a esse posto de trabalho uma atenção redobrada. Deve haver um controlo apertado da manutenção a este posto de trabalho. Os planos de manutenção preventiva devem ser cuidados de forma a que as intervenções de manutenção sejam rápidas, eficientes e nos momentos que menos afectem a produção. Se possível fora das horas de trabalho. Além disso, sempre que possível, levar a cabo pequenas operações de manutenção com a máquina em funcionamento. A manutenção pró-activa (predictive maintenance) deve ser equacionada e avaliada para estes postos de trabalho.
- Há também a questão da qualidade. Um posto de trabalho estrangulamento não pode produzir peças sem qualidade pois isso equivaleria a ter o posto parado. O sistema de qualidade deve estudar muito detalhadamente as questões de qualidade para este posto de trabalho. As peças devem ser produzidas sempre bem à primeira. Devem projectar-se, sempre que possível, sistemas automáticos de controlo para manter todos os parâmetros de qualidade sempre dentro dos limites.
- Não esquecer a organização do posto de trabalho. Todos os detalhes de organização devem ser estudados continuamente. As ferramentas e dispositivos de fixação usados neste posto de trabalho devem ser cuidadosamente posicionadas e o seu uso deve ser optimizado de forma a eliminar ao máximos tempos improdutos. Recorrer ao método dos “5S” para organizar um posto de trabalho estrangulamento é uma decisão acertada.
- Os tempos de preparação (*Setup*) ou tempos mudança de série não podem ser esquecidos. Além destes tempos serem claramente tempos improdutos há também a questão vital: quanto maiores forem estes tempos maior é a tendência para a produção de grandes lotes (causando inventário). O método SMED (*Single Minute Exchange of Die*) deve ser usado para os estrangulamentos.
- Uma coisa que não pode nunca falar a um estrangulamento é o abastecimento de materiais. O sistema de planeamento e controlo da produção ou, mais concretamente, o sistema de controlo da produção ou o sistema de programação da produção, não pode em caso algum permitir que falte materiais a um posto de trabalho estrangulamento. Atrás (a montante) de um estrangulamento é dos poucos lugares onde é permitido algum inventário para que se garanta que nunca falta materiais para processamento no estrangulamento.

Podemos dizer então que há dois tipos de postos de trabalho: os postos de trabalho estrangulamento e os postos de trabalho de não estrangulamento. A taxa de utilização de um posto de não estrangulamento é imposta pelos constrangimentos do sistema e não pela seu próprio potencial. Os postos de trabalho não estrangulamento não podem produzir durante todo o tempo e sendo assim, esse tempo improdutivo pode ser usado em operações de manutenção. É claro que para isso os operadores terão de ter alguma formação em manutenção.

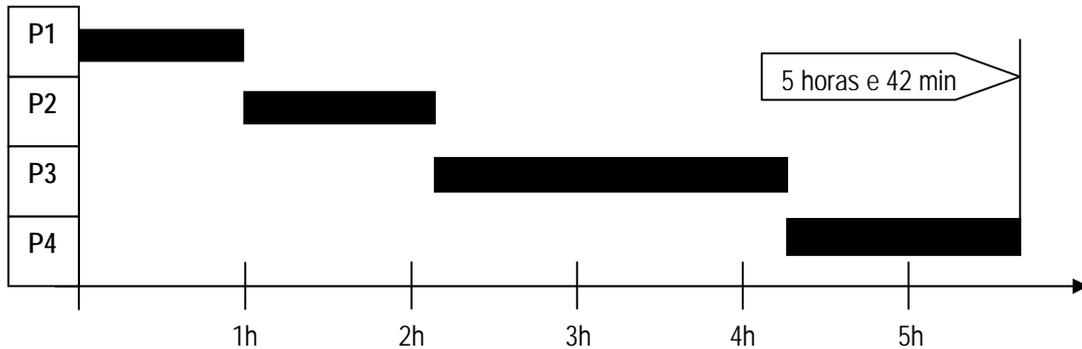
Sempre que seja necessário equacionar a compra de um novo equipamento produtivo, a tendência clássica, de seleccionar um equipamento de alta taxa de produção cujo custo por peça resulta baixo, pode ser errada. Se uma vez em produção a taxa de produção real desse equipamento for ditada pelo estrangulamento, então é muito natural que o custo real por peça venha a ser muito maior do que o previsto.

### **3. Lote de transferência versus lotes de fabrico**

O conceito de lote não é tão claro como pode ser suposto à primeira vista. Todas as pessoas acabam por ter dificuldades em definir lote. Muitos dizem: “um lote é um conjunto de peças iguais”. As duas canetas iguais que tenho na minha gaveta serão do mesmo lote? Pode ser que não. O conceito de lote está intimamente ligado ao ponto de vista. Numa máquina ou numa linha, um lote

pode ser considerado como o conjunto de peças produzidas até que se mude para a produção de outro produto ou peça. O lote pode ser definido pelo sistema de PPC. Muito mais pode ser dito sobre o assunto mas agora apenas nos interessa o seguinte:

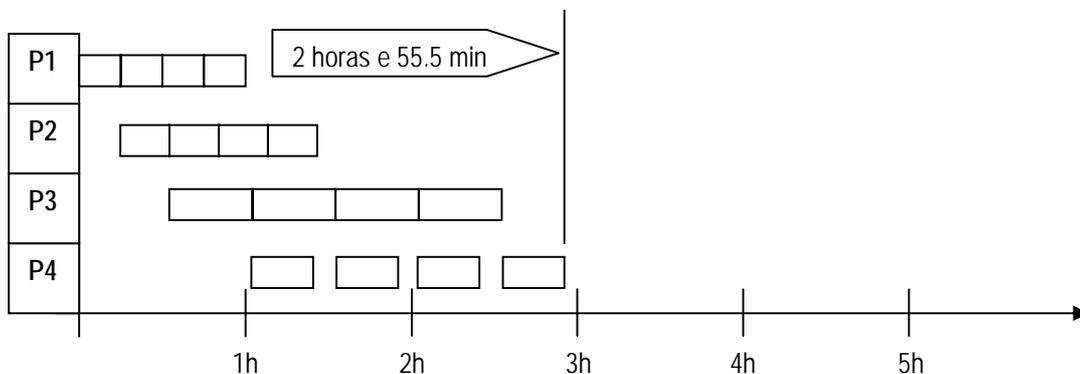
- Um lote de fabrico é o conjunto de peças produzidas sem que haja, durante esse fabrico, a produção de peças diferentes.
- Um lote de transferência é a quantidade de peças que é transferida de um posto de trabalho para o próximo.



**Figura 2 – Lote de transferência igual ao lote de produção.**

Para clarificar estes conceitos e para mostrar a importância da diferença entre eles no desempenho de um sistema produtivo vamos considerar o seguinte exemplo:

Para o sistema produtivo da figura 1 vamos considerar o fabrico de um lote de 300 peças. Sendo assim, o tempo de percurso<sup>1</sup> do lote de fabrico será de 5 horas e 42 minutos como mostra a figura 2.



**Figura 3 – Lote de transferência igual a um quarto do lote de produção.**

Considerando agora que, para o mesmo exemplo, o lote de fabrico de 300 peças decidimos dividi-lo em 4 lotes de transferência de 75 peças cada. Desta forma, quando as primeiras 75 peças fossem produzidas na primeira máquina seriam imediatamente transferidas para a segunda máquina e assim por diante. O resultado seria o ilustrado na figura 3. O tempo de percurso

<sup>1</sup> Trata-se do tempo que ente o instante em que a primeira peça começa a ser produzida na primeira máquina e o instante em que a última peça do lote deixa a última máquina. Em inglês é frequentemente designado de *Flowtime*.

resultante seria de 2 horas e 55,5 segundos, cerca de metade do conseguido anteriormente. Além de se conseguir prazos de entrega mais curtos, o que é um importante factor de competitividade, consegue-se também uma redução no nível médio de inventário. Um exercício interessante é o de calcular essa redução.

A título de curiosidade a quantidade de peças em processamento no sistema é normalmente designada por *WIP (Work In Process)* e o seu valor é obtido pelo produto do tempo de percurso (*Flowtime*) pela taxa de produção (Lei de Little)<sup>2</sup>.

#### 4. O Impacto do Inventário

Uma dos factores interessantes da teoria das restrições passa pelo facto de dar ênfase aos aspectos práticos das empresas. Partir do objectivo das empresas para depois construir soluções de organização e gestão que contribuam de forma eficaz na concretização desse objectivo. Qual é o objectivo das empresas em geral? O que é que de facto querem os donos e os investidores das empresas? Será realista pensar que os investidores e os trabalhadores ponham o seu dinheiro e o seu esforço na empresa com o interesse altruísta de providenciar melhores serviços para os clientes? Ou porque querem melhor imagem e maior quota de mercado? Será que os investidores e operários são impelidos pelo orgulho de terem os produtos com melhor qualidade?

É perfeitamente aceitável que o objectivo das empresas seja o ganhar dinheiro no presente e garantir que se ganhe dinheiro no futuro. Mas qual é de facto o significado disso? Estaremos a falar do Lucro Líquido? da taxa de retorno do capital investido (Rendibilidade do Investimento)? Ou do fluxo de caixa (*Cash Flow*)? O lucro líquido é uma medida absoluta do resultado do negócio, a Rendibilidade do Investido é uma medida relativa desse resultado e o Fluxo de Caixa dita a sobrevivência presente da empresa.

Todos estes 3 indicadores são importantes para indicar a saúde financeira da empresa mas são inadequadas para medir o impacto que algumas acções possam ter nestes indicadores. Qual é o impacto do tamanho dos lotes nestes indicadores? Qual é o impacto da compra de uma máquina de comando numérico nesses indicadores?

Goldratt propõe uma ligação entre alguns indicadores da produção e os indicadores financeiros gerais da empresa de que falamos atrás. Os indicadores da produção propostos são os seguinte: Inventário, fluxo de produção e despesas de operação.

**Inventário** - diz respeito a todo o dinheiro investido na compra de tudo aquilo que se pretende transformar para posteriormente vender. Esta definição é diferente da tradicional pois exclui o valor acrescentado da mão-de-obra (MDO) e os custos indirectos.

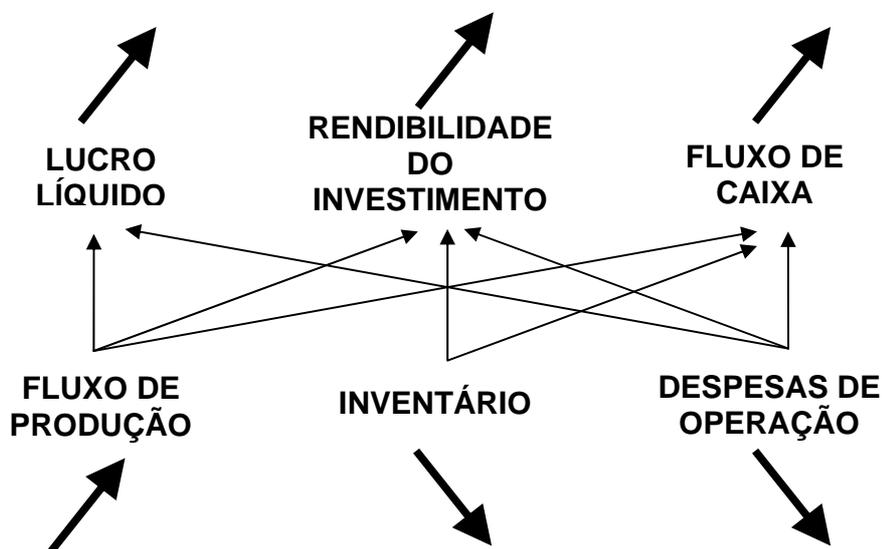
**Fluxo das Produção (*Throughput*)** - representa a taxa a que a organização gera dinheiro através das vendas. De notar que a diferença entre através das vendas e não através da produção. Se produzirmos algo e não o vendermos então não gera fluxo de produção. Só conta o que gerar dinheiro.

**Despesas de Operação** – todo o dinheiro gasto pelo sistema produtivo para transformar Inventário em Fluxo de Produção. Esta definição inclui o custo da MDO e os custos indirectos (gestão, computadores, secretárias). Se o trabalho de uma secretária não contribui para transformar Inventário em Fluxo de Produção então o seu salário não é um despesa de operação, é simplesmente um desperdício.

---

<sup>2</sup>  $WIP = Throughput \times Flowtime$

De acordo com a Teoria das Restrições, só aumentamos o desempenho financeiro da empresa se aumentarmos o Fluxo de Produção, reduzirmos as Despesas de Operação e/ou reduzirmos o Inventário (ver figura 4). Qualquer outra acção não traz qualquer alteração no desempenho financeiro da empresa.



**Figura 4 – Impacto directo dos indicadores de produção.**

Quando aumentamos o fluxo de produção (expresso em vendas) sem afectar negativamente o inventário e as despesas de operação, estamos directamente a aumentar os 3 indicadores financeiros (lucro líquido, retorno do investimento e o fluxo de caixa). Se o fluxo de dinheiro a entrar na empresa aumenta então o lucro líquido aumenta pois para os mesmos custos (despesas de operação) conseguimos mais dinheiro a entrar. Se entra mais dinheiro então temos mais dinheiro em caixa (fluxo de caixa) e se entra mais dinheiro então mais depressa obtemos o retorno do capital investido. O impacto directo da redução das despesas de operação nos 3 indicadores financeiros é o mesmo que o impacto directo do aumento do fluxo de produção.

A redução do inventário não tem impacto directo no Lucro Líquido mas apenas na Rendibilidade do Investimento e no Fluxo de Caixa. Será que se pode dizer que o inventário é menos importante do que os outros indicadores de produção? Não podemos cair neste erro típico.

O fluxo de produção (resultados das vendas) e das despesas de operação sempre foram assumidos com indicadores importantes e sempre foram levados em conta, mas o inventário sempre foi sistematicamente menosprezado. Veremos aqui que além da sua importância directa no desempenho económico da empresa devemos prestar atenção ao impacto indirecto que tem o inventário no desempenho financeiro da empresa. Vamos então analisar esse impacto indirecto.

Como sabemos, ao reduzir o inventário estamos também a reduzir algumas despesas de operação como por exemplo: custo do capital empatado em inventário, espaço de armazenamento, custos de manuseamento, etc.. Algumas empresas estimam que o custo de posse do inventário andar por volta de 25% do valor do inventário. Como ao reduzir o inventário estamos a reduzir as despesas de operação então fica claro de uma forma indirecta estamos a aumentar os 3 indicadores financeiros de que se tem vindo a falar.

Cada vez há mais a ideia que, para além do impacto referido atrás, há benefícios intangíveis na redução do inventário. Acredito que devemos dar sempre ênfase à redução dos inventários, mesmo que já sejam baixos. A redução do inventário trará sempre benefícios na competitividade.

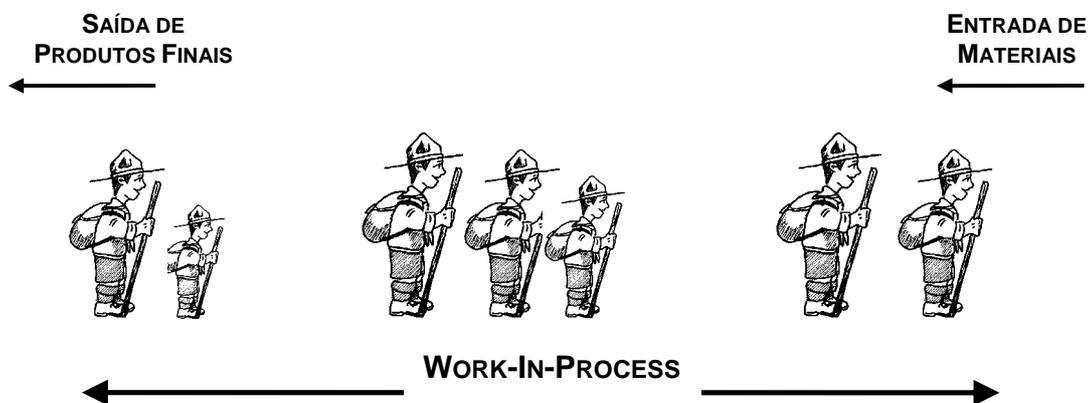
Mas uma pergunta é legítima: Se a redução do inventário é assim tão importante porque será que as empresas não estão já a produzir com baixos níveis de inventário?

Qualquer gestor conhece bem que o nível de vendas e as despesas de operação tem uma enorme importância a curto prazo. Por isso tem medo que ao reduzir o inventário esteja a alterar negativamente esses indicadores. Se por falta de inventário forem perdidas algumas entregas de produtos aos clientes dentro do prazo, é muito natural que venha a perder dinheiro. Além disso, também se pode ter medo de, pelo facto de ter baixo inventário alguns postos de trabalho estejam temporariamente à espera de trabalho e isso representa aumento das despesas de operação. Estas são razões mais se suficientes para que qualquer gestor, pelo sim pelo não, mantenha algum inventário para se proteger.

Então é necessário ter um sistema de programação da produção que mantenha níveis de inventário baixos sem por em causa a taxa de produção e as despesas de operação. Um sistema que garante isso é proposto por Goldratt, chama-se *Drum-Buffer-Rope* e é apresentado a seguir.

## 5. O conceito de *Drum-Buffer-Rope*

Para entendermos o conceito de *Drum-Buffer-Rope* vamos dar uso à analogia dos escuteiros a caminhar na montanha. Se deixarmos que cada escuteiro caminhe com o seu passo natural e se permitirmos que se ultrapassem sempre que quiserem teremos uma tendência para ter o mais rápido à frente, o segundo mais rápido imediatamente a seguir e por aí adiante até ao mais lento. A distância entre eles irá aumentar naturalmente e toda a fila se irá dispersando ao longo do caminho da montanha.



**Figura 5 – A analogia dos escuteiros numa caminhada.**

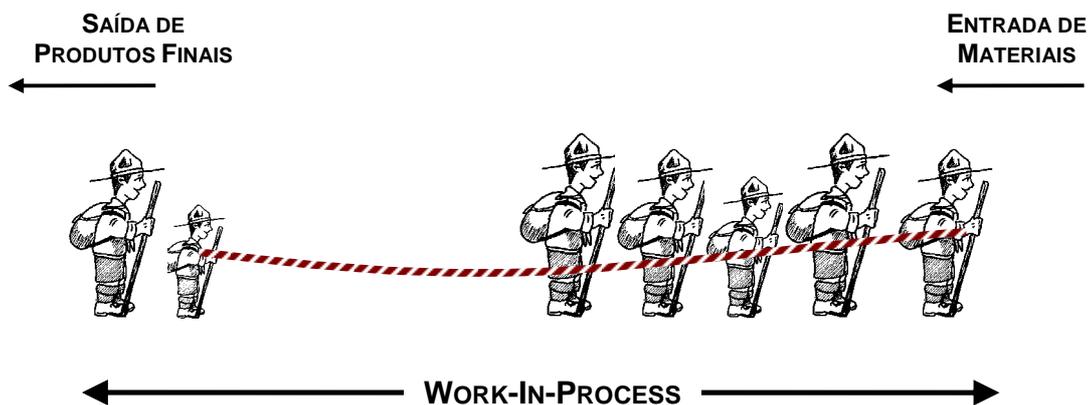
A velocidade com que cada um caminha é equivalente à taxa de produção de um processador (máquina). A distância entre eles é equivalente ao inventário entre duas máquinas consecutivas. O WIP equivale à distância entre o primeiro e o último.

Quanto mais distantes estiverem os escuteiros uns dos outros maior será o WIP. Se pudermos reduzir essa distância sem diminuir a velocidade do mais lento estamos a reduzir o WIP mantendo a taxa de produção. É exactamente isto que queremos fazer nos nossos sistemas produtivos. Como podemos diminuir essa distância?

Na analogia, uma forma de fazer isso é por o escuteiro mais lento à frente e não permitirmos que o ultrapassem. Como devem imaginar esta solução não pode ser posta em prática na realidade dos sistemas produtivos. Não podemos simplesmente mudar os planos de processo das peças. Se a terceira operação for a que corresponde à operação que demora mais tempo, não podemos simplesmente passá-la para primeira operação, há problemas de precedência que teremos de seguir.

Para que a analogia continue a servir os nossos objectivos temos de incluir uma limitação relacionada com a impossibilidade de alterar a posição relativa dos escuteiros. O escuteiro mais lento não pode ser enviado para a frente da fila, terá de ser mantido na posição que ocupava originalmente.

Como se pode então limitar a velocidade de toda a equipa à velocidade do escuteiro mais lento? Uma forma de o fazer é ligar uns aos outros com cordas. O comprimento das cordas dita a distância máxima que podem ter uns dos outros. Nos sistemas produtivos a analogia da corda é conseguida com o sistema Kanban. O kanban dita o inventário máximo entre dois postos de trabalho. O único problema que poderemos ter com o sistema Kanban é que se um escuteiro pára para apertar os atacadores das botas então rapidamente todos terão de parar também e perdeu-se a velocidade de todo o grupo de escuteiros (taxa de produção).



**Figura 6 – Drum-Buffer-Rope (analogia).**

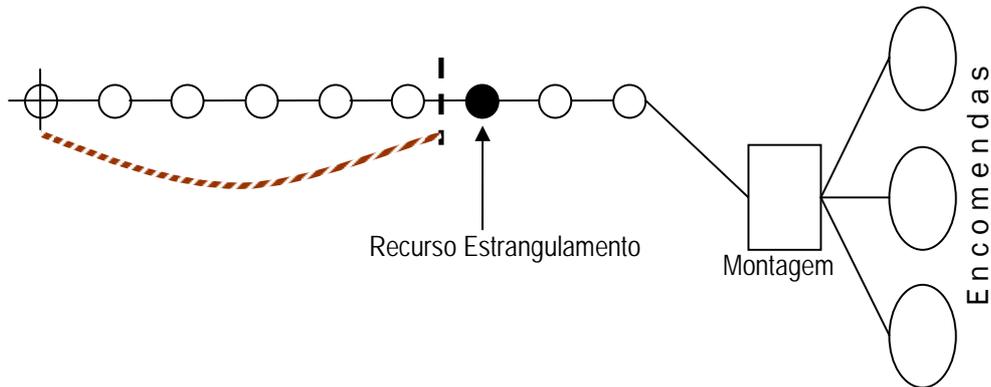
A proposta da técnica Drum-Buffer-Rope baseia-se em apenas usar uma corda que ligue o escuteiro mais lento ao escuteiro da frente (figura 6). Esta abordagem é denominada de "Drum-Buffer-Rope". O termo *Drum* (tambor) diz respeito ao passo ditado pelo processador mais lento, o termo *Buffer* diz respeito ao inventário que será criado a montante do processador mais lento e o termo *Rope* (corda) diz respeito à limitação forçada pelo processador mais lento, a que fica sujeito o primeiro processador (processador mais a montante onde é levada a cabo a primeira operação).

Se um escuteiro, que não o mais lento, pára para apertar os atacadores das botas, isso não deverá afectar o andamento do mais lento, garantindo assim a velocidade de caminhada de todo o grupo. Depois de apertar os atacadores, o escuteiro em causa recuperará o caminho perdido. É obvio que isto depende do comprimento da corda. Se a corda for curta e o escuteiro demorar muito tempo a apertar os atacadores então isso acabará por impedir o escuteiro mais lento de prosseguir a caminhada. O comprimento da corda deve ser estudado de tal forma que, para todas as paragens previstas dos outros escuteiros, o escuteiro mais lento nunca terá de parar.

## 6. A técnica “*Drum-Buffer-Rope*”

Vamos começar por considerar um sistema produtivo simples e linear como mostra a figura 7. Neste, como em qualquer outro sistema produtivo há pelo menos um estrangulamento (círculo negro na mesma figura). A técnica *Drum-Buffer-Rope* (DBR) reconhece que esse estrangulamento dita a taxa de produção do sistema produtivo como um todo. É então esse posto de trabalho ou recurso (estrangulamento) o tambor (*Drum*) que marca o passo da produção. A taxa de produção desse recurso irá marcar o passo de todo o sistema produtivo. O único lugar onde irá ser mantido inventário será imediatamente atrás desse recurso e em mais lado algum (identificado com uma linha interrompida na figura). Esse inventário deverá ter um tamanho mínimo que garanta que nunca haverá falta de material para esse recurso e o seu tamanho máximo será garantido pela taxa de alimentação de materiais ao recurso mais a montante. Essa taxa deverá ser igual à taxa de produção do estrangulamento.

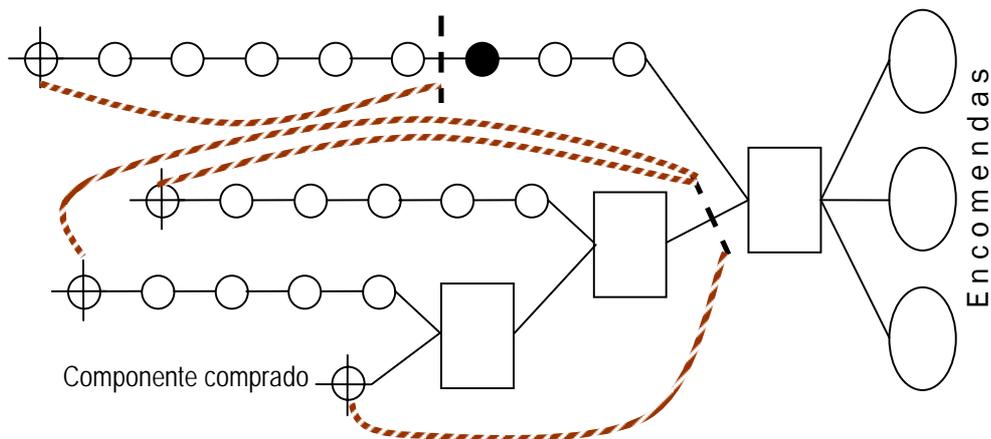
Toda a programação da produção será centrada no estrangulamento. É capacidade do estrangulamento dita a programação da produção de todo o sistema dependendo da procura externa e do seu próprio potencial. O primeiro passo é programar a produção no estrangulamento usando os princípios conhecidos de programação em máquina única.



**Figura 7 – O estrangulamento num sistema produtivo simples.**

Seguidamente, a programação de produção dos recursos a jusante desse estrangulamento é muito fácil pois basta programar o início de cada operação quando a operação precedente terminar. Como esses recursos tem capacidade superior ao estrangulamento não haverá, normalmente, criação de inventário.

A programação das operações precedentes é o próximo desafio. Em primeiro lugar precisamos de definir o tamanho do inventário que precede o estrangulamento. Esse tamanho é, na analogia, o comprimento da corda. Esse tamanho deve ser tal que permita que, mesmo havendo algum problema num dos recursos precedentes, algum tempo sem abastecimento desse inventário, o inventário não chegue a zero. Se o inventário chegasse a zero, o estrangulamento teria de parar por falta de material e como sabemos o estrangulamento nunca pode parar. Vamos supor que qualquer problema que possa haver pode ser resolvido em dois dias. Dando um dia de segurança obtemos um inventário de 3 dias como sendo o nível necessário antes do estrangulamento. Uma vez definido esse nível de inventário, teremos de programar os recursos que precedem o estrangulamento de forma a alimentá-lo adequadamente para que seja garantido sempre um inventário de 3 dias para o estrangulamento.

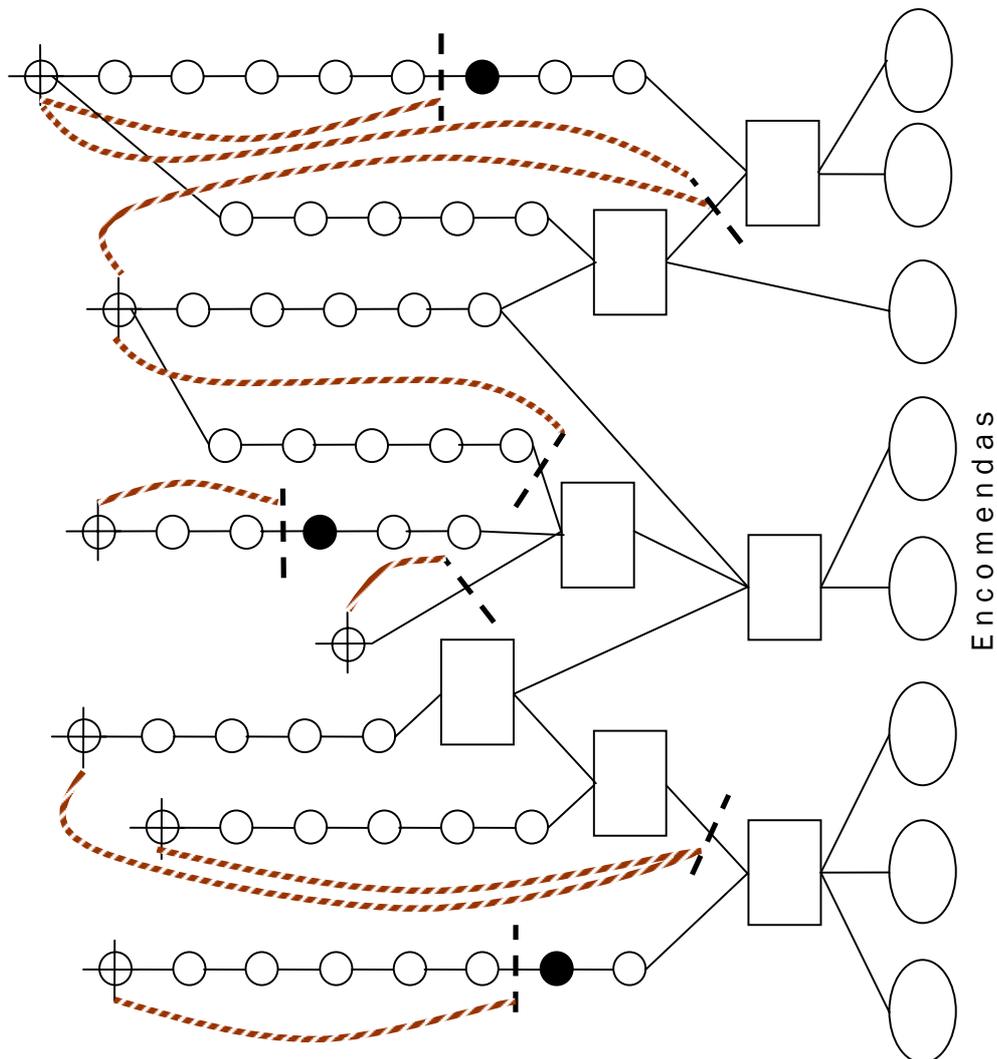


**Figura 8 – O diversos inventários propostos.**

O que vimos até aqui permite proteger o estrangulamento de paragem por falta de material mas devemos também pensar no cumprimento das datas de entrega. A programação da montagem final é muito dependente da frequência a que chegam os componentes que vem de um sistema com estrangulamento (componentes críticos). Por esta razão, devemos impedir que a montagem possa ser limitada por falta de material que não seja esse material crítico. Se a montagem final tiver os tais componentes críticos mas estiver à espera de componentes não críticos, então a entrega dos produtos finais pode estar a ser posta em causa, não pela capacidade restrita de um estrangulamento mas pela deficiente programação da produção que não faz chegar à montagem final todos os componentes no momento correcto.

Para nos protegermos desse risco, deve considerar-se outro inventário a preceder a montagem final (ver figura 8). Assim, depois de termos construído a programação da montagem final, teremos de construir também 3 dias de inventário de todos os outros componentes necessários para a montagem final. Uma vez criado esse inventário, há que proceder à programação do abastecimento das linhas/células onde esses componentes são produzidos de forma a garantir que o referido inventário seja mantido. Se algum desses componentes é comprado ao exterior então a programação das compras deve ser levada a cabo de forma a conseguir as mesmas garantias, 3 dias de inventário.

Em sistemas produtivos reais, o número de produtos finais e o número de componentes é, geralmente, muito maior e complexo. Alguns componentes são usados em mais do que um produto final, há mais do que um estrangulamento e a identificação dos estrangulamentos pode não ser fácil. Apesar de serem simples os cálculos para a programação da produção, quando se trata de sistemas reais, o número de máquinas, de componentes e de produtos finais é tão grande que é impensável dispensar um sistema informático para o efeito. A figura 9 pretende dar apenas uma ideia dessa complexidade.



**Figura 9 – Os “Drums” e as “Ropes” num sistema complexo.**

## 7. Identificação de Estrangulamentos

Há sistemas produtivos onde é bastante fácil identificar os estrangulamentos mas em muitos casos essa tarefa é bastante difícil. As mudanças nos requisitos do mercado, os picos de procura de um ou de outro produto específico podem alterar os estrangulamentos. Quando o número de produtos e componentes é elevado e os planos de processo (planos de fabrico ou gamas operatórias) são muito diferentes de produto para produto e de componente para componente, a detecção dos estrangulamentos pode ser tarefa difícil para pequenas mudanças de procura. Nestes casos os estrangulamentos podem ser diferentes todas as semanas. Também pode ser difícil detectar estrangulamentos nos sistemas produtivos cuja cultura é a de manter grandes quantidades de inventário ao longo do sistema produtivo e onde se cultiva a produção de grandes lotes.

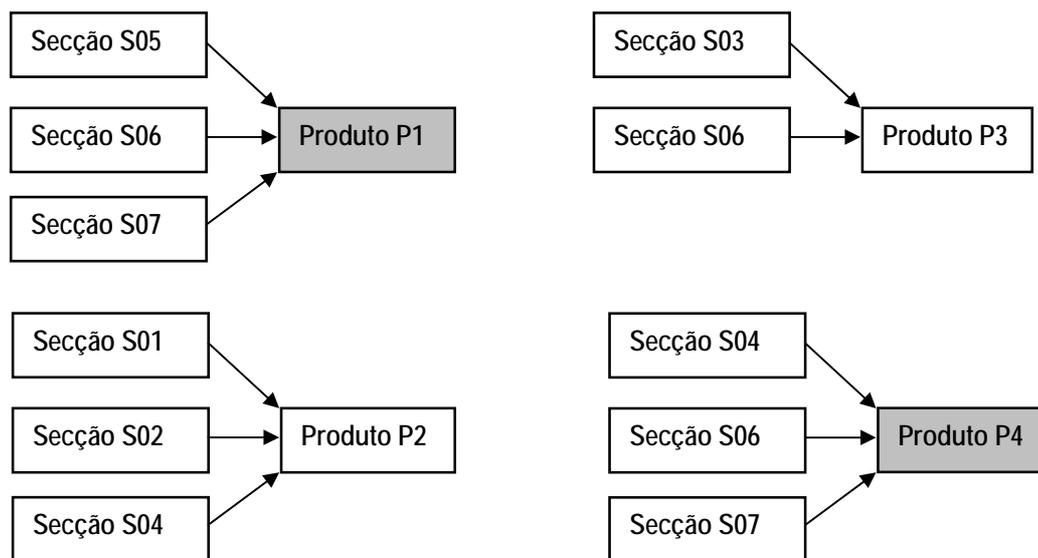
Em alguns casos a detecção de estrangulamentos pode requerer tanto tempo de pesquisa que torna proibitivo esse processo. Há contudo o reconhecimento de que um estrangulamento deve

manifestar-se num ou em alguns aspectos do negócio. À luz desta afirmação há duas regras simples que devem ser consideradas:

- Se um posto de trabalho tem constantemente níveis de inventário imediatamente a montante então é bastante provável que se trate de um estrangulamento.
- Os produtos que frequentemente são entregues com atraso passam certamente em postos de estrangulamento durante o seu fabrico.

A figura 10 apresenta um exemplo de detecção de estrangulamentos. Os produtos 1, 2, 3 e 4 são produzidos nas secções que constam na mesma figura. Sabe-se que os produtos P1 e P4 são entregues sempre com atraso. Usando esta informação tende descobrir quais as secções que muito provavelmente serão estrangulamentos.

Pela segunda regra apresentada há pouco, as secções candidatas a estrangulamento são todas aquelas por onde passam os produtos P1 e P4. Assim sendo, podemos dizer que as secções S04, S05, S06 e S07 são secções suspeitas. Como a secção S04 também faz parte do trajecto do produto P2 então poderemos tirar a secção S04 da lista das “secções suspeitas” visto que o produto P2 não é entregue com atraso. A secção S6 também pode ser retirada dessa lista por razões similares. Como a secção S05 não é comum ao trajecto dos dois produtos críticos então também pode ser retirada da lista. Só nos resta então a conclusão de que a secção S07 é muito provavelmente o estrangulamento.



**Figura 10 – Detecção de estrangulamentos.**

## 8. Programar a Produção pela técnica DBR

O primeiro passo é definir a sequência de produção no estrangulamento. Trata-se de um problema bastante simples no complexo espectro tradicional de programação da produção. É apenas um problema de sequenciação em máquina única onde se pode aplicar regras simples de despacho como FIFO (*Fist In First Out*) SPT (*Shortest Processing Time*) ou EDD (*Earliest Due Date*).

Uma boa regra para fazer a sequenciação dos lotes no estrangulamento é ordenar pelas datas de entrega (EDD). Esta regra pode não ter bom desempenho em 4 diferentes casos:

O primeiro caso ocorre quando o tempo de processamento remanescente (depois do estrangulamento) é muito diferente de uma peças para as outras. Nestes casos uma outra regra que consistem em subtrair à data de entrega o tempo de processamento remanescente. Esta regra tem como base a folga existente até à data da entrega. Nestes casos as peças ou lotes devem ser ordenados segundo a sua menor folga.

O segundo caso ocorre quando um estrangulamento alimenta outro estrangulamento. Nestes casos, ao usar a regra EDD podemos estar a esvaziar o inventário atrás do outro estrangulamento.

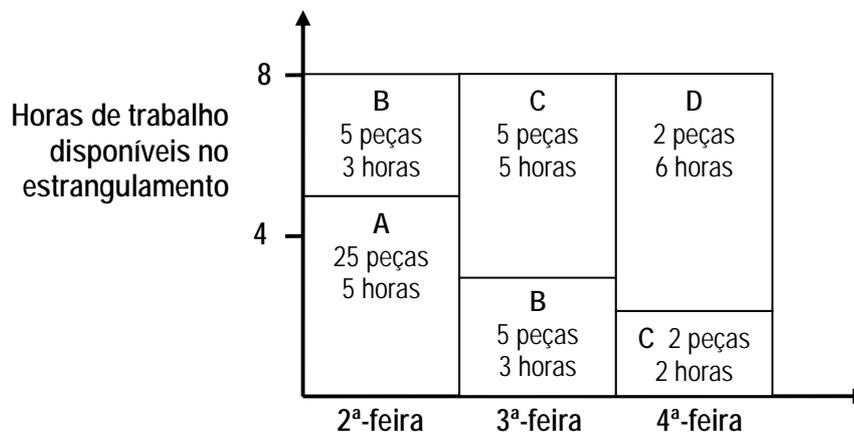
O terceiro caso ocorre quando os tempos de preparação do estrangulamento para a mudança de lote são consideráveis ou variam com a sequência. Nestes casos deve tentar encontrar-se sequências que minimizem o tempo perdido em preparações. É claro que não se deve perder de vista os limites aconselháveis de inventário e o cumprimento das datas de entrega.

O último caso ocorre quando mais do que um componente para o mesmo produto passa no mesmo estrangulamento.

Vamos agora avançar para um exemplo simples de sequenciação à luz da técnica DBR. Suponhamos que nos encontramos no fim de uma semana e um conjunto de lotes devem ser processados durante a próxima semana. Esse lotes, depois de ordenados pelas datas de entrega aparecem na seguinte sequência:

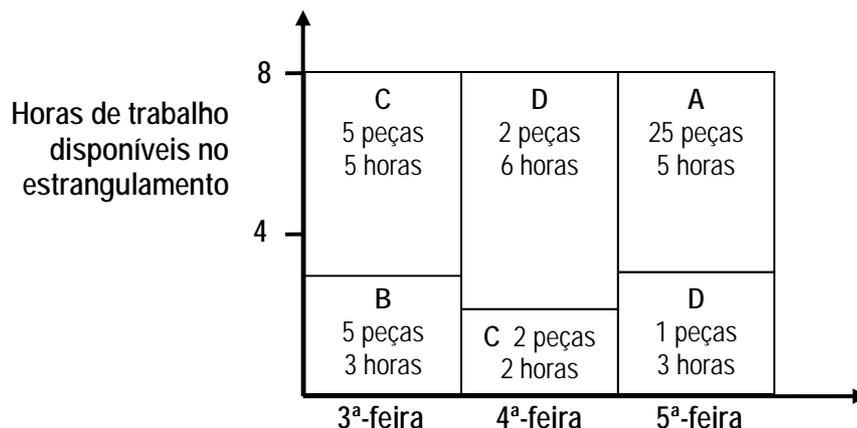
Componente	A	B	C	D	A	C	B
Quantidade	25	10	7	3	25	2	10
Tempo de processamento (horas)	5	6	7	8	5	2	6

Se assumirmos um inventário de 3 dias para o nosso estrangulamento, o programa de produção para o recurso estrangulamento deverá resultar no apresentado na figura 11.



**Figura 11 – Programa de produção para o estrangulamento.**

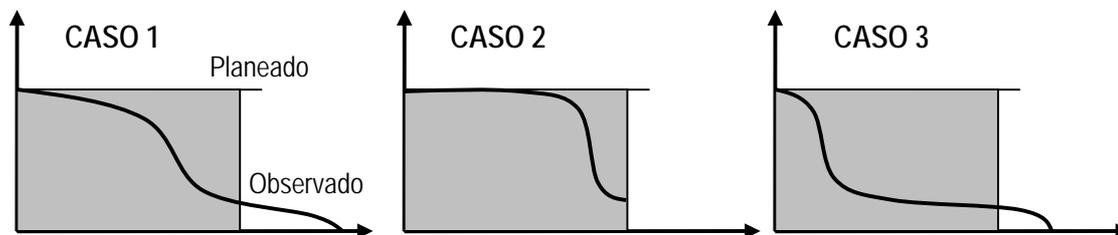
Nenhum outro lote deverá ser programado para o recurso em questão pois esse é o inventário máximo admitido. O conteúdo deste inventário vai sendo alterado à medida que o tempo passa. Na terça feira de manhã, o conteúdo do mesmo espaço de armazenamento deverá ser igual ao apresentado na figura 12. As peças que tinham sido programadas para serem processadas na 2ª feira já deveriam ter sido processadas e enviadas para os recursos seguinte dos seus planos de processo e os lotes que deverão chegar ao estrangulamento na 6ª feira ainda estão a ser processadas nos recursos que precedem o estrangulamento.



**Figura 12 – Programa de produção para o estrangulamento (3ª feira de manhã).**

## 9. Gestão do Estrangulamento

A composição do armazém local anexo ao estrangulamento sugerida nas figuras 11 e 12 é apenas a composição planeada e como devem imaginar ela pode não ser exactamente a composição real observada, basta que ocorram pequenas perturbações no sistema. Devemos esperar que o conteúdo do referido armazém local seja menor do que o planeado. Se o armazém estiver sempre completo quer dizer que não há perturbações significativas ao ponto de afectar o planeado fluxo dos materiais. Se este comportamento se mantiver durante muito tempo então poder-se-á reduzir, digamos, de 3 para 2 dias de inventário. Se o conteúdo do armazém local afecto ao estrangulamento for inferior ao planeado então estaremos na presença de alguma perturbação no sistema. Há três casos típicos de comportamento do conteúdo do armazém como mostra a figura 11.



**Figura 13 – Comportamento real e planeado no inventário do estrangulamento.**

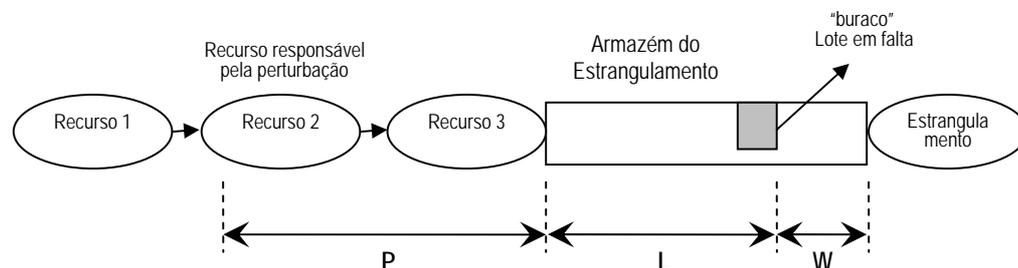
O caso 1 da figura mostra que algum material chega ao estrangulamento antes do previsto. Nestes casos mais disciplina é necessário impor no sistema para que as ordens não sejam iniciadas antes do previsto.

O caso 2, onde o armazém está quase cheio, é uma clara indicação de que o armazém está sobredimensionado. Pode diminuir-se ao tamanho do armazém, diminuindo as despesas de operação.

No caso 3, nem um terço do armazém está completo, indicando que este armazém está subdimensionado, havendo o risco de parar o estrangulamento por falta de material. Medidas devem ser tomadas para que o primeiro terço do armazém esteja completo. Quer isto dizer, para o nosso exemplo de 3 dias, devermos garantir inventário pelo menos para o primeiro dia.

A comparação entre o conteúdo planeado com o observado revela que lotes ou peças estão a faltar (por outras palavras, os buracos na fila de espera do estrangulamento). Essas falhas nas peças ou lotes são causadas por perturbações no fluxo de materiais das operações precedentes ou falhas dos fornecedores. Nestes casos além de ser importante descobrir a causa da perturbação é também importante quantificar essa perturbação. Descobrir o recurso ou o fornecedor causador da perturbação não é uma tarefa muito complicada, basta descobrir onde está o lote ou lotes que deveriam estar na fila de espera do estrangulamento.

Quanto à quantificação da perturbação há 4 parâmetros a considerar para cada “buraco” (figura 14): o parâmetro “Y” que representa o número de horas de processamento necessárias para processar, no estrangulamento, o lote ou peça em falta. Um segundo parâmetro é o “W” que representa o tempo que ainda há até que o estrangulamento precise desse lote ou peça. O terceiro parâmetro “P” diz respeito ao tempo de processamento necessário até que essa peça ou lote chegue ao estrangulamento. O quarto parâmetro “L” representa o atraso existente da peça ou lote na fila de espera (armazém do estrangulamento)



**Figura 14 – Comportamento real e planeado no inventário do estrangulamento.**

Com esta informação poderemos criar um indicador para a severidade de cada perturbação. Vamos chamar-lhe Factor de Perturbação. Alguns autores consideram apenas o parâmetro L como indicador (Factor de Perturbação = L) outros consideram o produto entre o parâmetro L e o parâmetro Y (Factor de Perturbação = L x Y) como sendo o indicador da severidade da perturbação. Poderíamos também propor o produto entre Y e a soma de P com L (Factor de Perturbação = [P+L] x Y).

Se estivermos na presença de várias perturbações no sistema então devemos começar por solucionar as perturbações cujo indicador Factor de Perturbação seja maior.

## 10. Os passos do processo associado à TOC

Com o objectivo de clarificar a sistematização do uso da teoria, podemos simplificá-la através de uma lista de passos necessários à sua materialização. Os passos são os seguintes:

- I. Identificar os estrangulamentos. Os dois maiores estrangulamentos as restrições que o sistema de produção tem de lidar são a procura do mercado e as restrições de capacidade.
- II. Decidir na forma de explorar os estrangulamentos do sistema. Há apenas um pequeno número de estrangulamentos em qualquer sistema produtivo. A técnica *Drum-Buffer-Rope* reconhece que são esses estrangulamentos que ditam a taxa de produção de todo o sistema (marcam o ritmo).
- III. Todos os outros recursos ficam dependentes da decisão anterior. Uma vez criados os armazéns junto aos estrangulamentos, qualquer outro inventário é perda de dinheiro e além disso pode por em causa o cumprimento das datas de entrega.

- IV. Aumentar a capacidade dos estrangulamentos. Pode ser necessário comprar mais máquinas, contratar pessoal ou criar turnos, reduzir tempos de preparação, etc..
- V. Se algum estrangulamento deixar de o ser, voltar ao ponto 1. Aviso: É muito importante não deixar que a inércia seja o próximo estrangulamento. Muitos problemas dos sistemas produtivos derivam de políticas e regras que eram apenas correctas no momento em que foram criadas. As empresas dedicam muito mais tempo no trabalho de “apagar fogos” do que a limpar o “lixo” do sistema.

## **11. Bibliografia**

Courtois A., Pillet M. e Martin C., 1997, Gestão da Produção, Lidel – Edições Técnicas, Lda.

Goldratt, E.M. and Fox, R.E., The Race, North River Press, Croton-on-Hudson, New York, NY, 1986.

Goldratt, E.M. and Cox, J. (1993), The Goal, 2nd ed, Gower Publishing Company, ISBN 0-566-07418-4.

Goldratt, E.M. (1997), Critical Chain, North River Press, Great Barrington, MA.

Halevi, G. (2001), Handbook of Production Management Methods, Butterworth-Heinemann, ISBN 0 7506 5088 5

Heizer, J. and B. Render (2000). Operations Management, Prentice Hall, 0-13-018604-x

Vollmann T E, William L B and Whybark D C, 1992, Manufacturing planning and control systems, Richard D. Irwin, Inc., third edition, ISBN 0-256-08808-X.