# Modelo de simulação para determinação da operacionalidade de locomotivas

Maria Elisa Cunha * José Álvaro Assis Lopes † Ana Paula Barbosa Póvoa †

* Universidade Autónoma de Lisboa
melisacunha@ual.pt

† Centro de Estudos de Gestão – DEG – Instituto Superior Técnico
apovoa@ist.utl.pt

**Abstract**

Inventory management is an important area within the organizations since it determines the operability of the organization system. When the material to be managed involves repair, its control is complex and very important. This complexity is due to different reasons like system structure, associated times and multi-indenture item structure.

In this paper, a real case study is analyzed which describe the stock management of the CP 1900 Locomotive components.

The Locomotives may need repair due to components breakdowns or potential limit reached. Depending on the failure, the locomotives can be repaired at different places that define different echelons in a multi-echelon inventory model for repairable items. Repair time depends on the components' stock on the shelf or, if there are none, on the repair time of the missing items.

In the 1900 Locomotives, four items are considered: the diesel engine, the turbo compressor, the traction engine and the system wheels. Locomotives' maintenance can be performed in two different locations depending on the components breakdown "Região de Manutenção Centro or Sul" – RMC/RMS or "Grupo Oficinal do Barreiro" – GOB. For diesel, traction engines and wheels breakdowns maintenance take place at GOB, second echelon in the system. Locomotives' failures due to turbo compressor malfunctioning occur at RMC and RMS, third echelon. And finally, the components repairs happen at GOB or at GOE, first echelon.

A simulation model is developed in this paper to establish the relationship between the average number of operational locomotives and the stock of the four components. A Binomial distribution is used to generate locomotives failures. A limited repair capacity and empirical distributions are assumed for the items repair time.

Apdio © 2003 *Associação Portuguesa de Investigação Operacional*

**Resumo**

A gestão de "stocks" é uma área fulcral para o bom desempenho das organizações; dela depende frequentemente a operacionalidade do sistema em causa. Quando os bens a gerir são reparáveis essa gestão, além de importante, torna-se mais complexa. Esta complexidade é diversa e depende de vários factores como sejam a estrutura do sistema de reparação, tempos associados e ainda a própria estrutura modular do artigo reparável.

Neste artigo estuda-se um caso real onde a gestão de "stocks", de artigos constituintes das Locomotivas da série 1900 dos Caminhos de Ferro Portugueses – CP, é analisada.

A exploração das Locomotivas faz com que estas possam avariar ou necessitar de manutenção preventiva. As avarias são provocadas pelo mau funcionamento de constituintes e, dependendo do seu tipo, podem ser reparadas em locais distintos. Estes podem constituir diferentes escalões num modelo de gestão de avarias. Por outro lado, o tempo de paragem de cada locomotiva, por manutenção ou reparação, depende fundamentalmente do número de peças em armazém ou, na sua inexistência, do tempo de reparação dos constituintes em falta.

No caso em estudo, Locomotivas da série 1900, por questões relacionadas com a determinação da sua operacionalidade consideram-se, apenas, quatro constituintes fundamentais: Turbo Compressor, Motor Diesel, Motor de Tracção e Rodados. A reparação das locomotivas, dependendo do conjunto de operações a realizar, pode ser executada em dois locais diferentes: na Região de Manutenção (Centro e Sul), à qual está afecta a locomotiva (elemento do terceiro escalão), ou no Grupo Oficinal do Barreiro (segundo escalão). As reparações dos constituintes, dependendo do tipo de avaria, são efectuadas no Grupo Oficinal do Barreiro ou no Grupo Oficinal do Entroncamento (primeiro escalão).

Considerando distribuições Binomiais para gerar avarias nas locomotivas e distribuições empíricas para gerar o tempo de reparação dos constituintes, desenvolveu-se um modelo de simulação discreto para o sistema multi-escalão e multi-componente das Locomotivas. Desta forma pretende-se estabelecer uma relação entre o número médio de Locomotivas em condições de viajar e o "stock" físico dos quatro constituintes referidos.

**Keywords:** Simulation, Stochastic Models, Decision Aid Systems

**Title:** Locomotives' operability simulation model

---

# 1 Introdução

A gestão de "stocks" é uma área fulcral para o bom desempenho das organizações, pois dela depende frequentemente a operacionalidade do sistema em causa. Quando os bens a gerir são reparáveis essa gestão, além de importante, é mais complexa.

Um factor de complexidade relaciona-se com a estrutura do sistema onde o artigo reparável se integra. É típico que este tipo de produtos façam parte de estruturas multi-escalão, com pelo menos dois níveis. No nível mais baixo encontram-se as bases, no nível mais elevado situa-se, pelo menos, um depósito. Este deverá abastecer as bases. Decisões como "quando encomendar" e "quanto encomendar" têm que ser definidas para todos os escalões. O nível de "stock" definido para as bases tem implicações directas sobre o tempo de reparação dos artigos na base; o nível de "stock" definido para o depósito afecta o tempo de aprovisionamento das bases e o tempo de reparação dos artigos no depósito, Sherbrooke (1992).

O desconhecimento do valor tomado pelos tempos, quer de reparação quer de abastecimento, constitui outro factor de complexidade. Pode ser definida uma distribuição de probabilidade para o tempo de reparação de cada artigo; a distribuição depende da complexidade da avaria e da disponibilidade de recursos no centro de reparação. Uma segunda distribuição de probabilidade pode ser fixada para quantificar o tempo de abastecimento, definido como sendo o intervalo de tempo que decorre entre o instante em que é colocada a encomenda ao depósito e aquele em que o artigo é recebido na base, se no depósito existirem unidades disponíveis. Uma terceira distribuição de probabilidade pode ser admitida para o intervalo de tempo que decorre até que exista um artigo no depósito em condições de ser enviado para a base, Sherbrooke (1992).

A estrutura modular, em terminologia anglo-saxónica "multi-indenture", do artigo reparável é um novo factor de complexidade. Esta situação surge porque é necessário fazer uma optimização conjunta de todos os constituintes, independentemente do nível hierárquico em que se situam na árvore de decomposição do produto. É, pois, fundamental decidir sobre "os itens que se devem armazenar: os de nível superior e/ou os de nível inferior". Uma vez que um item, de determinado nível, é composto por outros itens de nível menor, consequentemente de custo inferior e com maior probabilidade de serem utilizados por outros artigos "pai", parece ser preferível armazenar os itens de nível mais baixo. Contudo, esta decisão acarreta algumas desvantagens, pois quando um componente avaria é necessário mais tempo e um conhecimento mais especializado para diagnosticar a avaria e substituir os elementos de menor nível, causadores do mau funcionamento. Esta razão aponta para que sejam armazenados os artigos de nível superior. Assim, para determinar os níveis de "stock", é necessário ponderar as duas situações referidas, Sherbrooke (1992).

Como é mencionado por Cunha et al (2001), têm sido desenvolvidos muitos modelos de gestão de "stocks" para determinar o número de artigos a armazenar em cada um dos locais da estrutura multi-escalão, de modo a satisfazer determinados níveis de serviço e/ou condicionantes de ordem económica, política ou estrutural da organização. Dos modelos estudados salientam-se aqueles apresentados nos trabalhos de Sherbrooke (1968), modelo METRIC, Graves (1985) e Diáz e Fu (1997). Não obstante, alguns aspectos estão ainda por resolver e a investigação, na área, continua com o objectivo de relaxar as restrições de aplicabilidade existentes nos vários modelos propostos.

Foi com este objectivo que se desenvolveu o presente trabalho. Considerando o sistema multi-escalão de reparação das Locomotivas da série 1900, desenvolveu-se um modelo de simulação no qual se estuda a sua exploração e manutenção, preventiva ou curativa, bem como a reparação dos respectivos constituintes. Por razões operacionais, consideraram-se, apenas, quatro constituintes identificados como fundamentais: Turbo Compressor, Motor Diesel, Motor de Tracção e Rodados.

A manutenção das locomotivas, dependendo do conjunto de operações a realizar, pode ser executada em dois locais diferentes: na Região de Manutenção (Centro ou Sul) à qual está afecta a locomotiva, considerada como um elemento do escalão mais baixo, ou no Grupo Oficinal do Barreiro, pertencente a um escalão superior. Os constituintes da locomotiva são, também, reparados em dois locais distintos: os Motores Diesel, os Turbo Compressores e os Motores de Tracção, cujo induzido não necessita ser rebobinado, no Grupo Oficinal do Barreiro, enquanto que os Motores de Tracção, que precisam do induzido rebobinado, e os Rodados no Grupo Oficinal do Entroncamento.

Neste estudo, considera-se que as trinta locomotivas em exploração avariam segundo uma distribuição Binomial, de parâmetros estimados a partir da distribuição empírica do número de avarias verificadas por trimestre. Todos os centros de reparação têm capacidade limitada e as distribuições para os tempos de reparação são empíricas.

Através do modelo desenvolvido, pretende-se estabelecer uma relação entre o "stock", a definir para os quatro constituintes considerados, e o número médio de locomotivas em condições de operar, isto é, que não necessitam de manutenção. Esta pode ser necessária quer por avaria quer por se ter atingido o limite de potencial de um dos componentes em estudo (Motor Diesel, Turbo Compressor, Motor de Tracção ou Rodado).

Este documento está organizado da forma seguinte. Na secção 2, é descrito o problema multi-escalão e é feita uma breve apresentação dos modelos que se consideraram mais relevantes para o desenvolvimento do trabalho. Na secção 3, faz-se a identificação do sistema das Locomotivas da série 1900, cujo comportamento se estrutura a partir do modelo de simulação desenvolvido e caracterizado na secção 4. Na secção 5, procede-se à análise dos resultados obtidos. Finalmente, na secção 6, apresentam-se as conclusões e indicam-se desenvolvimentos futuros.

## 2 A gestão de reparáveis em estruturas multi-escalão

As estruturas multi-escalão, cuja operacionalidade é dominada pelos artigos reparáveis, são constituídas, na maioria dos casos práticos, por dois escalões. Este motivo originou a que os modelos fossem desenvolvidos admitindo aquele número de níveis. O mais baixo, designado por *base*, é composto por $n$ elementos e o escalão de nível mais alto, designado por *depósito*, é composto por um só elemento. Atendendo à natureza dos artigos reparáveis (procura pouco frequente, custo unitário elevado, tempo de abastecimento longo e ciclo de vida lato ao fim do qual é mais rentável reparar o artigo do que substituí-lo), a política de gestão admitida pela maioria dos modelos, quer para o envio de artigos para reparação quer para a encomenda de artigos a reutilizar, é do tipo $(S-1, S)$. Este conceito simplifica a análise do problema, permitindo que o processo da procura seja idêntico nas *bases* e no *depósito*, Sherbrooke (1992).

Genericamente, e como se esquematiza na Figura 1, um sistema com dois escalões pode ser descrito como se segue. Quando um artigo em utilização avaria, é levado para a *base*, à qual está associado, e é solicitado ao armazém outro para o substituir. Se existirem, no armazém da *base*, artigos prontos a reutilizar, procede-se à satisfação do pedido; caso contrário, o pedido fica a aguardar até que, na *base*, existam artigos nessa condição – diz-se que o pedido é "backordered". A reparação dos artigos pode ser efectuada na *base*, com uma probabilidade $r$, ou no *depósito*, com uma probabilidade $(1-r)$. Sempre que um artigo é enviado para o *depósito*, a *base* encomenda-lhe um outro, idêntico, que possa ser imediatamente utilizado. Se o *depósito* possuir em armazém artigos para satisfazer o pedido, procede de imediato ao seu envio; caso contrário, o pedido fica a aguardar até que no *depósito* existam artigos reparados, situação designada por "backordered". Terminada a reparação, os artigos são colocados no armazém do local onde foram reparados ou caso existam pedidos suspensos nesse local proceder-se-á à sua satisfação. Como resultado final, pretende-se determinar o número de artigos a manter em armazém, quer na *base* quer no *depósito*, de modo a atingir determinada medida de desempenho do sistema, satisfazendo condicionantes de ordem económica, política ou estrutural.

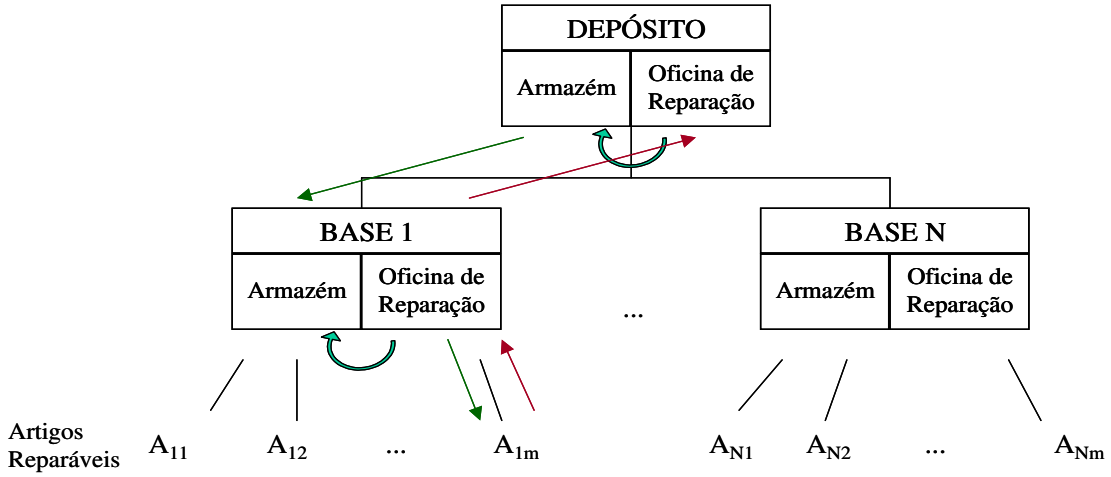


Figura 1: Estrutura de um sistema com dois escalões.

Dos diversos modelos de gestão desenvolvidos, podem salientar-se como mais importantes os seguintes: o primeiro a satisfazer os dois requisitos anteriormente apontados foi designado por METRIC (Multi-Echelon Technique for Recoverable Item Control, Sherbrooke (1968)). Baseia-se nos seguintes pressupostos: a população de onde são geradas as avarias é tão grande que pode ser considerada infinita e a capacidade do centro de reparação é ilimitada. Sob estas condições, a quantidade procurada é idêntica ao nível de ocupação duma fila de espera do tipo M/G/$\infty$. Deste modo, Sherbrooke determina o número de artigos a armazenar, quer no depósito quer nas bases, ajustando uma distribuição de Poisson ao número de unidades existentes no centro de reparação. A partir desta distribuição, define o número esperado de artigos pedidos pela base ao depósito mas que, por falta de unidades disponíveis, ainda não foram por este entregues, ou seja, calcula o número de unidades "backordered" no depósito. Esta distribuição permite caracterizar uma medida de operacionalidade do sistema, definida como sendo a percentagem média de artigos que não estão à espera de constituintes para serem reparados. Sherbrooke provou que ela é máxima quando o número de "backorders" for mínimo.

Graves (1985) utiliza o mesmo ajustamento que Sherbrooke (1968) para calcular o número de artigos a armazenar no depósito, mas, para a determinação do número de artigos a manter nas bases, propõe o ajustamento através duma distribuição Binomial Negativa.

Mais tarde, Diáz e Fu (1997) utilizam o mesmo princípio que Graves (1985) para determinar o número de artigos a armazenar nas *bases*, mas propõem que o cálculo dos artigos a armazenar no *depósito* seja feito com base numa distribuição Binomial Negativa.

Nestes dois últimos trabalhos não se questiona a relação, provada pelo autor do primeiro modelo, entre a operacionalidade do sistema e o número de "backorders".

Apesar do trabalho desenvolvido, ainda hoje se procuram alternativas que melhor se adaptem aos sistemas reais. Esta pesquisa deve-se, sobretudo, a dois tipos de limitações nos modelos existentes. A primeira, diz respeito às características demasiado restritivas dos pressupostos, que impedem que os sistemas reais sejam adequadamente sintetizados. A segunda, relaciona-se com a natureza aplicacional do modelo pois, para que seja facilmente utilizável, é fundamental que seja pouco complexo, quer em termos de compreensão quer em termos de aplicação. Não

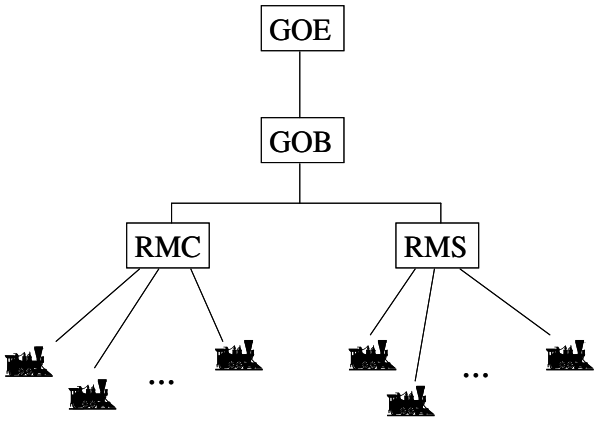


Figura 2: Estrutura de um sistema "Locomotivas Série 1900".

nos podemos esquecer que, devido à dependência existente entre os elementos que constituem a estrutura multi-escalão (por mais simples que seja), o modelo matemático associado tende a ser complexo, pois tem de determinar, simultaneamente, todos os parâmetros de controlo.

O presente trabalho tem como objectivo principal superar algumas dessas limitações, através do desenvolvimento de um modelo de simulação genérico.

## 3 Descrição do sistema "Locomotivas Série 1900"

O sistema "Locomotivas Série 1900" tem características multi-escalão com a estrutura indicada na Figura 2.

No nível mais baixo situam-se as Regiões de Manutenção, Centro (RMC) e Sul (RMS), às quais estão afectas as locomotivas em exploração. Existe um escalão intermédio, o Grupo Oficinal do Barreiro (GOB), e um escalão superior, o Grupo Oficinal do Entroncamento (GOE).

A exploração das locomotivas origina o desgaste do material e, consequente, necessidade de manutenção, quer por avaria quer por se ter atingido o limite de potencial dos constituintes. Por cada 300.000 quilómetros percorridos ou 7.000 horas de trabalho, a locomotiva necessita de manutenção do *tipo V1*, na qual substitui o Turbo Compressor, os três Motores de Tracção e os seis Rodados. Por cada 600.000 quilómetros ou 14.000 horas, a locomotiva necessita de manutenção do *tipo R*, na qual é necessário efectuar a substituição dos elementos atrás referidos e do Motor Diesel.

Se a locomotiva não carece de manutenção, é mantida em operação; caso contrário, dependendo do tipo de operações a efectuar, será enviada para a Região de Manutenção, à qual está afecta, ou para o Grupo Oficinal do Barreiro. As Regiões de Manutenção apenas têm competência para substituir o Turbo Compressor. Caso tenha avariado o Motor Diesel, um dos Motores de Tracção ou um dos Rodados ou, ainda, se a locomotiva necessita de fazer uma reparação preventiva do *tipo V1* ou *R*, terá de ser dirigida para o Grupo Oficinal do Barreiro.

Ao enviar a locomotiva para a Região de Manutenção, admite-se que a reparação necessita de cerca de meio dia, desde que exista um Turbo Compressor disponível para substituir o ava-

riado; caso contrário, a locomotiva fica imobilizada, a aguardar reparação, até que exista um Turbo Compressor. Por outro lado, uma reparação no Grupo Oficinal do Barreiro é frequentemente muito demorada porque, de maneira geral, não existem componentes disponíveis. Na maioria das vezes, é necessário retirar o componente da locomotiva, proceder à sua reparação e tornar a colocá-lo. Quando todos os seus constituintes estiverem montados e os resultados de diversos testes tiverem sido favoráveis, a locomotiva admite-se pronta, por conseguinte, em condições de ser colocada em exploração.

Os constituintes são reparados em dois locais distintos, Grupo Oficinal do Barreiro ou Grupo Oficinal do Entroncamento. No primeiro local, são concertados os Motores Diesel, os Turbo Compressores e os Motores de Tracção, cujo induzido não necessita ser rebobinado. O envio de cada um destes elementos para as respectivas secções de reparação é feito imediatamente após terem sido retirados da locomotiva. Terminada a operação, os elementos são colocados no armazém ou na locomotiva, caso exista alguma que espere um dos constituintes. No Grupo Oficinal do Entroncamento, são reparados os Motores de Tracção, cujo induzido necessita de rebobinagem, e os Rodados. Neste caso, pode decorrer algum tempo entre o instante em que foram retirados da locomotiva e o seu envio para o Entroncamento. Depois de reparados os elementos, também, poderão esperar por transporte. Quando chegam ao Grupo Oficinal do Barreiro, são colocados no armazém respectivo ou numa locomotiva, caso alguma esteja à espera do elemento. Devido à especificidade do tipo de transporte exigido pelos Rodados, estes são transportados em grupos de seis.

## 4 Descrição do modelo de simulação

De forma a ultrapassar algumas das desvantagens, ainda persistentes no tratamento do problema da gestão de reparáveis, e que se prendem com a aplicação dos modelos desenvolvidos à resolução de casos reais, vamos, neste trabalho, desenvolver um modelo de simulação, de natureza discreta, que se pode considerar um caso mais generalizado do modelo apresentado em Cunha et al (2001). De uma forma sintética, pode-se dizer que são contemplados três escalões, dois deles com a possibilidade de reparação e de armazenagem e um, unicamente, com a possibilidade de reparação; as políticas de gestão utilizadas podem ser de duas naturezas distintas, $(S-1, S)$ ou $(S-n, s)$, dependendo do artigo em causa; são utilizadas distribuições empíricas em vez de distribuições teóricas.

O novo modelo foi aplicado à gestão de material constituinte das locomotivas da série 1900 (ver secção 3), com o intuito de determinar o número médio de locomotivas operacionais. Assim, consideraram-se as seguintes condições, definidas com base na descrição do sistema real:

Sistema em geral:

- existem três escalões: no terceiro escalão, duas Regiões de Manutenção, Centro (RMC) e Sul (RMS); no segundo escalão, o Grupo Oficinal do Barreiro (GOB); no primeiro escalão, o Grupo Oficinal do Entroncamento (GOE);
- no terceiro escalão, admite-se armazenar Turbo Compressores (TC); no segundo escalão, Turbo Compressores (TC), Motores Diesel (MD), Motores de Tracção (MT) e Rodados (R); no primeiro escalão, não existe possibilidade de armazenar constituintes;

- os pedidos de material reparado, aos armazéns, são satisfeitos segundo a ordem de entrada;
- as RMC e RMS apenas podem substituir Turbo Compressores, por avaria;
- no GOB pode ser efectuado qualquer tipo de reparação nas locomotivas, bem como, a reparação de TCs, MDs e MTs, sem rebobinagem do induzido;
- no GOE são efectuadas as reparações dos MTs, com rebobinagem do induzido, e de Rs;
- o tempo de reparação das locomotivas depende da existência ou não de constituintes; caso não existam é necessário esperar que cheguem da respectiva secção de reparação;
- o tempo de reparação dos constituintes das locomotivas é determinado utilizando distribuições empíricas, recolhidas nos diversos centros de reparação;
- os constituintes acabados de reparar são levados para o armazém respectivo, no GOB;
- a política de gestão utilizada, quer no envio de componentes avariados para as respectivas secções de reparação quer na encomenda de artigos a colocar na locomotiva, é do tipo $(S-n, S)$, onde $n$ representa o número artigos de cada tipo, retirados da locomotiva; excepção feita aos Motores de Tracção enviados para reparação no GOE ou daqui para o GOB, em que a política utilizada é do tipo $(S-1, S)$;

Locomotivas:

- cada locomotiva é constituída por quatro constituintes: um TC, um MD, três MTs e seis Rs;
- se não existe avaria na locomotiva, é necessário determinar se precisa de manutenção preventiva do *tipo V1* ou do *tipo R*; na primeira, são substituídos os seguintes constituintes: TC, MTs e Rs, ao passo que na segunda, para além destes, é também substituído o MD – o limite de potencial que determina a necessidade de manutenção é um dos parâmetros do modelo;
- as avarias nas locomotivas, devidas ao mau funcionamento de um dos constituintes, são geradas a partir duma distribuição Binomial;
- se a locomotiva avariou, é necessário identificar qual o constituinte que a originou (por análise de distribuições empíricas) e qual o grau de intervenção na locomotiva (por análise do potencial dos constituintes não avariados);
- as locomotivas que apresentem avaria no TC e cujo potencial dos constituintes não avariados não tenha ultrapassado determinada percentagem, definida como parâmetro do modelo, são reparadas na RM; caso contrário, são reparadas no GOB;

Regiões de Manutenção, RM:

- ao entrarem na RM, as locomotivas são colocadas numa fila de espera, de disciplina FIFO, até que exista disponibilidade para serem reparadas;

- admite-se a existência de uma linha de manutenção;
- quando uma locomotiva entra na linha de manutenção de uma das RM, são desencadeados três procedimentos:
  - é pedido ao armazém local um TC para substituir o avariado retirado da locomotiva; se no armazém não existirem artigos o pedido é definido como "backordered";
  - é pedido ao armazém do GOB um TC para reabastecer o armazém da RM; se no armazém não existirem artigos, o pedido é definido como "backordered";
  - o TC avariado é enviado para o GOB, para aí ser reparado;

Grupo Oficinal do Barreiro, GOB:

- ao entrarem no GOB, as locomotivas são colocadas numa fila de espera, de disciplina FIFO, até que exista disponibilidade para serem reparadas;
- admite-se a existência de duas linhas de manutenção;
- quando uma locomotiva entra numa das linhas de manutenção do GOB, por cada constituinte retirado da locomotiva, são desencadeados dois procedimentos:
  - são pedidos, ao armazém local, artigos equivalentes aos retirados da locomotiva para que se possa proceder à sua reparação; se não existirem, no armazém, o pedido é definido como "backordered";
  - os artigos retirados são enviados para as secções respectivas, para aí serem reparados;
- o TC, o MD, os MTs e os Rs retirados da locomotiva são imediatamente enviados para a respectiva secção de reparação no GOB, onde são colocados numa fila de espera, de disciplina FIFO, ou ficam a aguardar transporte, se necessitam de reparação no GOE;

Grupo Oficinal do Entroncamento, GOE:

- ao entrarem no GOE, os MTs e os Rs são encaminhados para a secção de reparação respectiva onde são colocados numa fila de espera, de disciplina FIFO.

Contrariamente aos modelos referidos na secção 2, neste trabalho calcula-se a operacionalidade do sistema de uma forma mais geral, não contabilizando apenas as locomotivas que estão paradas por falta de constituintes, mas todas aquelas que estão paradas por não possuírem condições de operar. Isto acontece em três situações: quando uma locomotiva necessita de manutenção, curativa ou preventiva, ou quando a locomotiva sofre um acidente. Em qualquer destes casos, a unidade é retirada de exploração e enviada para o centro de manutenção registando-se o instante de tempo em que isso aconteceu. Como consequência, aumenta-se de uma unidade o número de locomotivas sem condições de operar e diminui-se uma unidade ao número de locomotivas em operação. Quando uma locomotiva acaba de ser reparada, é colocada em operação, aumentando-se de uma unidade o número de locomotivas em operação e diminuindo-se, de uma unidade, o número de locomotivas paradas.

O modelo de simulação que se desenvolveu, utilizando o "software" Extend$^{TM}$ (1998), é um modelo discreto, no qual o tempo avança em função da ocorrência dos acontecimentos. Estes, podem ser o final de um dia de exploração da locomotiva, no qual são incrementados os quilómetros e as horas aos seus constituintes, a ocorrência de uma avaria numa locomotiva, o início e o final da reparação da locomotiva ou de um dos seus quatro constituintes.

Nas Figuras 3 a 5 esquematiza-se o modelo desenvolvido. O movimento das locomotivas, dos seus constituintes e dos valores necessários aos testes a efectuar é sugerido pelas linhas orientadas. A cada bloco, identificado pelo seu nome (localizado na parte inferior do mesmo), está associada uma tarefa. Nos parágrafos seguintes apresenta-se uma explicação genérica do modelo.

Na Figura 3, representa-se a exploração das locomotivas. Inicialmente, faz-se a afectação às locomotivas de atributos considerados relevantes, como, por exemplo, a Região de Manutenção à qual está assignada, bem como o número de quilómetros e de horas de cada um dos constituintes. Depois desta atribuição, a locomotiva é enviada para exploração. Como consequência, alguns dos seus atributos são actualizados. Ao fim do dia testa-se se a locomotiva avariou. Caso haja avaria, é necessário testar qual dos seus componentes avariou – o Turbo Compressor, um dos Rodados, um dos Motores de Tracção ou o Motor Diesel. Se avariou o Turbo Compressor é necessário verificar qual o local de reparação, Região de Manutenção ou Grupo Oficinal do Barreiro, em função do potencial dos constituintes não avariados. Se avariou um dos Rodados, um dos Motores de Tracção ou o Motor Diesel ou se necessita de reparação preventiva a locomotiva é enviada para o Barreiro, mas as operações a efectuar dependem do potencial dos constituintes não avariados. Caso não haja avaria, testa-se se a locomotiva necessita de reparação preventiva do *tipo V1* ou *R*.

Na Figura 4, esboça-se a reparação das locomotivas na Região de Manutenção. Quando uma locomotiva é enviada para uma das Regiões de Manutenção, regista-se a data e a hora da entrada, depois é colocada numa fila de espera até que exista um técnico disponível. Quando isso acontece, a locomotiva é encaminhada para a linha de manutenção e o Turbo Compressor avariado é retirado da locomotiva para, posteriormente, ser enviado para reparação no Barreiro. Depois, solicita-se ao armazém local um Turbo Compressor reparado, para colocar na locomotiva, e, simultaneamente, pede-se ao armazém do Barreiro um Turbo Compressor para ser colocado no armazém da Região de Manutenção. Quando a reparação termina, a locomotiva é enviada para exploração registando-se, previamente, a data e hora em que sai da Região de Manutenção.

A Figura 5 esquematiza o Grupo Oficinal do Barreiro. Quando uma locomotiva é enviada para o Barreiro, regista-se a data e a hora da entrada, depois é colocada numa fila de espera até que uma das linhas de manutenção esteja disponível. Nesta altura, a locomotiva é lavada e testado o tipo de intervenção a realizar – manutenção do *tipo V1*, manutenção do *tipo R* ou reparação por avaria. Cada constituinte retirado da locomotiva é enviado para a secção de reparação respectiva ou colocado numa fila até que exista transporte, se necessitar de reparação no Entroncamento. Simultaneamente, é pedido ao armazém local um elemento reparado para colocar na locomotiva. Quando a reparação termina, a locomotiva é enviada para exploração, registando-se, previamente, a data e hora de saída do Grupo Oficinal do Barreiro.

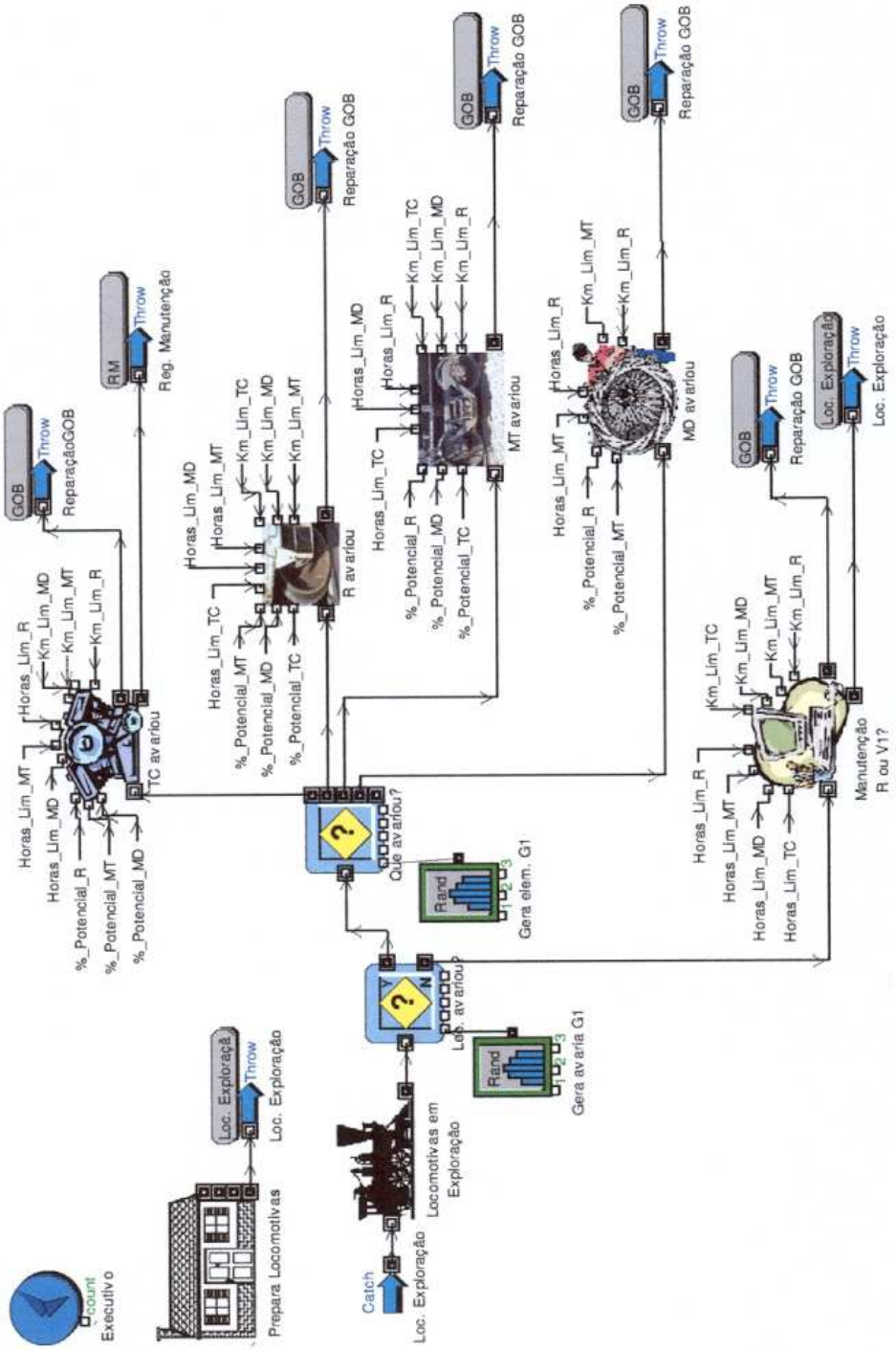


Figura 3: Preparação das locomotivas e sua exploração.

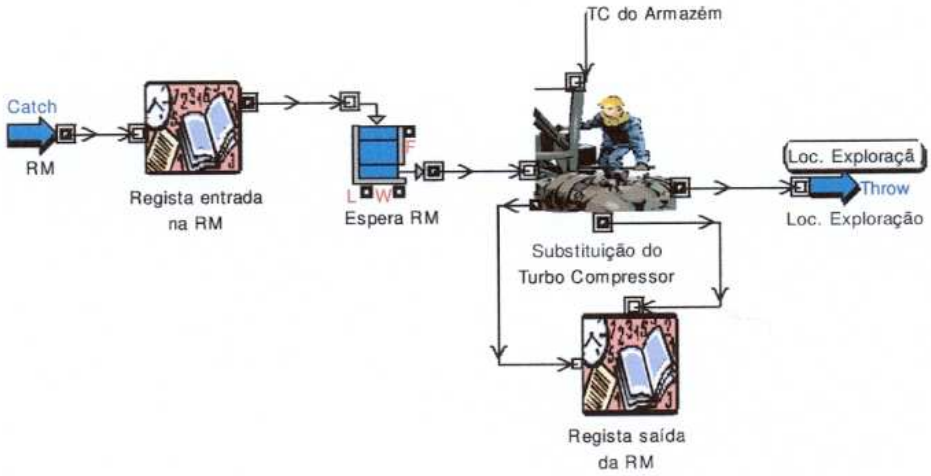


Figura 4: Reparação das locomotivas na Região de Manutenção.

# 5 Apresentação e análise de resultados

Com base nas hipóteses definidas e utilizando o modelo desenvolvido, procedeu-se à simulação do sistema de exploração e manutenção das Locomotivas 1900 da CP. A fim de estabelecer uma relação entre o número médio de locomotivas operacionais e o "stock" físico dos quatro componentes em estudo, dois aspectos principais foram explorados:

- a definição do "stock" dos componentes;
- a relação "stock" / operacionalidade.

## 5.1 Determinação do "stock" dos componentes

O intervalo de simulação foi determinado sob o pressuposto da inexistência de "stock" para qualquer dos quatro componentes, e admitindo que, por avaria de um componente, os restantes são substituídos se o seu potencial ultrapassar 75% do valor admitido para máximo. Por análise à estacionaridade da série das médias dos valores médios do número de locomotivas em exploração e do número de locomotivas nos diferentes locais de manutenção, decidiu-se que a duração da simulação seria de 100.000 horas.

Fixado o intervalo de simulação, iniciou-se a determinação da operacionalidade das locomotivas em função do "stock" existente, quer nas Regiões de Manutenção quer no Grupo Oficinal do Barreiro. Fizeram-se simulações múltiplas, fixando a semente de geração dos números aleatórios.

Inicialmente, fez-se variar o "stock" de cada componente de modo individual. Dado que o Turbo Compressor (TC), os três Motores de Tracção (MT) e os seis Rodados (R) são substituídos todos os 300.000 quilómetros ou 7.000 horas e que o Motor Diesel (MD) só é substituído todos os 600.000 quilómetros ou 14.000 horas, a primeira variação centrou-se nos três primeiros componentes. Nestes, a ordem de incremento das unidades em "stock" foi determinada em

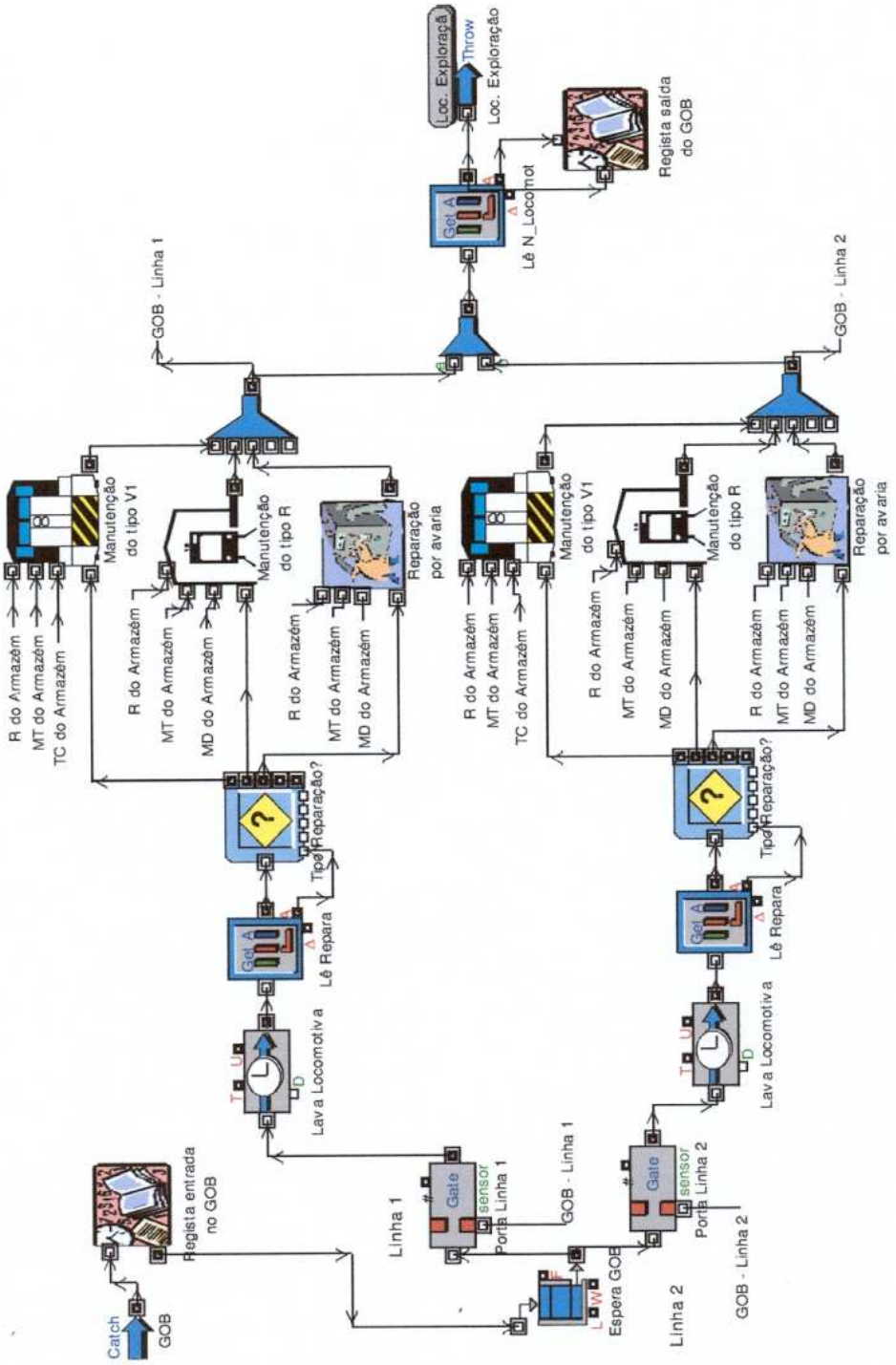


Figura 5: Reparação das locomotivas no Grupo Oficinal do Barreiro.

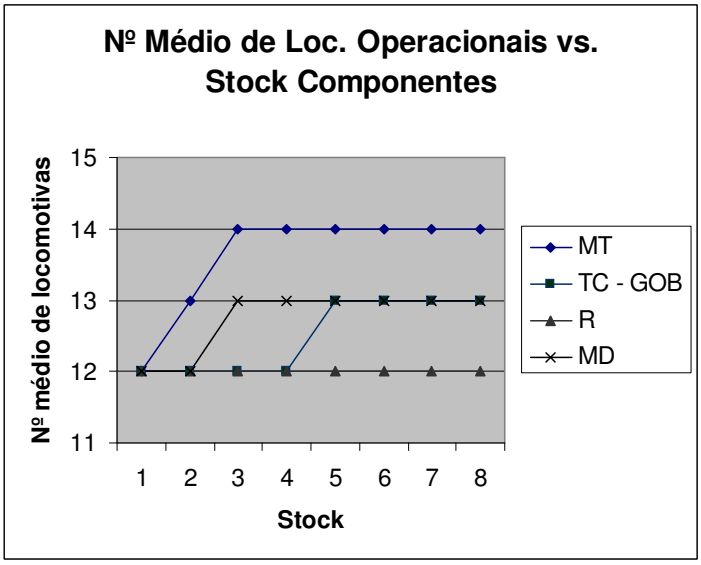


Figura 6: Nº médio de locomotivas operacionais vs. "stock" individual dos componentes.

função do número médio de dias de reparação. Atendendo a que, em cada manutenção do *tipo V1* ou *R*, se retiram da locomotiva três MTs, o número a armazenar considerou-se múltiplo de três. Pela mesma razão, o valor considerado para os Rs foi múltiplo de seis. O TC pode ser armazenado, quer no Grupo Oficinal do Barreiro (GOB) quer nas Regiões de Manutenção (Centro, RMC, e Sul, RMS). Como apenas pode existir transferência de constituintes reparados entre o GOB e as RM, admitiu-se, primeiramente, que o TC seria armazenado no GOB; considerando-se, depois, "stock" em cada uma das RM e, por fim, "stock" nos três locais. Embora não fosse atribuído qualquer valor ao custo de imobilização, as unidades admitidas em "stock" foram consideradas as razoáveis, quer pelo espaço de armazenagem disponível quer pelo custo previsto para o imobilizado.

Analisando o gráfico da Figura 6, verifica-se que o MT é o elemento que tem maior impacto sobre o número médio de locomotivas operacionais. No gráfico, não foram incluídos os resultados que admitiam existência de TCs nas RM, pois, independentemente do número de unidades em armazém, o número médio de locomotivas operacionais não era alterado, comparativamente à situação de inexistência de "stock". Situação perfeitamente compreensível, uma vez que a percentagem de locomotivas que recorre à manutenção naqueles locais é muito baixa.

Posteriormente, admitiu-se a existência de "stock" em armazém de dois componentes, MTs e TCs, depois de três constituintes, MTs, TCs e Rs, e finalmente dos quatro componentes. Nestas situações, apenas se admitiu a existência de "stock" de TCs no GOB. Independentemente do "stock" considerado de MTs e TCs, o número médio de locomotivas operacionais não passava das 13, quatro primeiros pontos do gráfico da Figura 7. Ao variar o "stock" de MTs, TCs e Rs o número médio de locomotivas operacionais oscilou entre 13 e 15, pontos correspondentes às abcissas 5 a 13 do gráfico da Figura 7. Os sete últimos pontos do mesmo gráfico correspondem à variação conjunta do "stock" de todos os constituintes considerados sendo, neste caso, 13 ou 14 o número médio de locomotivas operacionais.

A maior operacionalidade conseguida, em média 15 locomotivas operacionais durante o

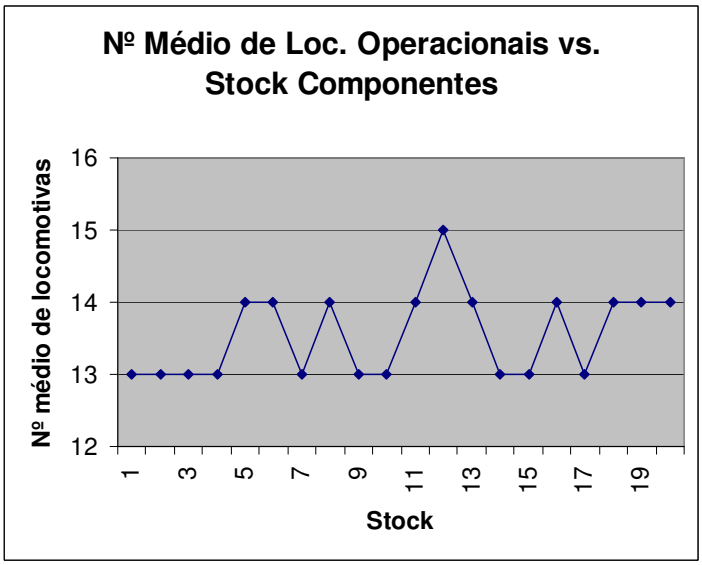


Figura 7: Nº médio de locomotivas operacionais vs. Variação conjunta do "stock" dos componentes.

intervalo de simulação, obteve-se com a seguinte afectação de "stock": seis TCs, dezoito MTs, vinte e quatro Rs e nenhum MD.

## 5.2 Variação do "stock" correspondente à maior operacionalidade

Considerando o "stock" anteriormente referido (seis TCs, dezoito MTs, vinte e quatro Rs e nenhum MD) colocaram-se algumas questões:

1ª – Qual será o número médio de locomotivas operacionais quando, por avaria de um dos componentes, se alterar a percentagem de potencial que obriga à substituição dos restantes?

2ª – Qual será o número médio de locomotivas operacionais se o limite de potencial dos componentes for aumentado em vinte por cento? A razão de ser desta questão relaciona-se com o facto de várias vezes a manutenção preventiva das locomotivas ser adiada até que o TC, os MTs e os Rs tenham cerca de 350.000 quilómetros ou 8.200 horas e o MD tenha cerca de 700.000 quilómetros ou 16.300 horas.

3ª – Será que o número médio de locomotivas operacionais, em resposta às duas questões anteriores, varia se for admitida uma semente aleatória para a geração dos números produzidos?

Por análise da Tabela 1, o número médio de locomotivas operacionais é maior quando as revisões de manutenção são mais espaçadas. Possivelmente esta situação acontece porque, atendendo à natureza do material utilizado e a questões de segurança associadas, não se espera que seja atingido o verdadeiro limite. É razoável que o número médio de locomotivas operacionais decresça quando, por avaria de um dos constituintes, a percentagem que obriga à substituição dos outros diminua, pois aumenta-se o número de vezes que os constituintes necessitam de manutenção. Quanto à semente utilizada para a geração de números aleatórios, é indiferente que seja considerada fixa ou aleatória, possivelmente devido à amplitude considerada para o intervalo de simulação.

Tabela 1: Nº Médio de Loc. Operacionais em função do potencial e da percentagem que obriga à substituição de componentes

| Geração aleatória de números | Potencial TC, MD, MT e R | % de potencial que obriga à substituição componentes não avariada | Nº médio locomotivas operacionais |
|---|---|---|---|
| Semente fixa | Aumentado | 90% | 16 |
| | | 75% | 16 |
| | | 50% | 15 |
| | | 25% | 14 |
| | Igual | 90% | 14 |
| | | 75% | 14 |
| | | 50% | 13 |
| | | 25% | 12 |
| Semente aleatória | Aumentado | 90% | 15 |
| | | 75% | 16 |
| | | 50% | 15 |
| | | 25% | 13 |
| | Igual | 90% | 14 |
| | | 75% | 14 |
| | | 50% | 13 |
| | | 25% | 12 |

Quando se fez variar individualmente o número de unidades armazenadas de cada um dos componentes, verificou-se que eram os MTs que determinavam o número de locomotivas operacionais. Deste modo, o "stock" que conduzia ao maior número médio de locomotivas operacionais foi alterado, considerando-se que apenas se armazenavam os dezoito MTs. Procurou-se então resposta às questões anteriormente enunciadas. Os resultados da simulação encontram-se no gráfico da Figura 8.

Ao ser analisada a figura, concluí-se que o número médio de locomotivas operacionais é idêntico nas duas hipóteses consideradas para "stock". A primeira, mais dispendiosa por armazenar mais componentes (seis Turbo Compressores, vinte e quatro Rodados e dezoito Motores de Tracção), apenas supera a segunda (dezoito Motores de Tracção) em dois dos dezasseis valores; a segunda é melhor do que a primeira numa das situações; para os restantes valores, o número médio de locomotivas é igual. Assim, pode-se admitir que é preferível armazenar apenas Motores de Tracção.

## 6 Conclusões e pesquisa futura

Sherbrooke (1968) definiu operacionalidade dum sistema como sendo a percentagem média de artigos que não estão à espera de constituintes para serem reparados e calculou-a com base no número de unidades "backordered" no depósito. Graves (1985) e Diáz e Fu (1997) utilizaram o mesmo conceito.

No presente trabalho, estudou-se o sistema de exploração e manutenção (preventiva e curativa) das locomotivas da série 1900 através dum modelo de simulação discreto. Pretendia-

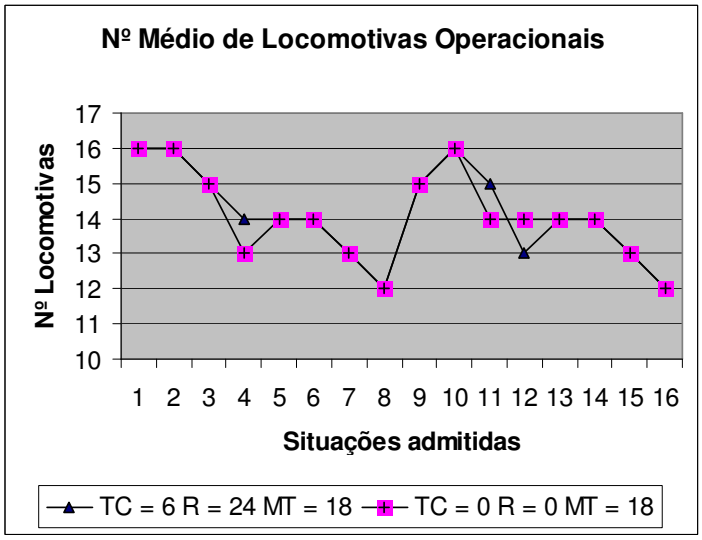


Figura 8: Duas hipóteses alternativas de "stock".

se determinar o número médio de locomotivas operacionais, considerando todas as locomotivas que estão paradas por não possuírem condições de operar. Esta situação ocorre sempre que uma locomotiva necessita de manutenção preventiva (quando algum dos constituintes atingiu o limite de potencial) ou de manutenção curativa (quando um dos constituintes avariou) ou, por último, quando sofre um acidente.

Concluiu-se que o número médio de locomotivas operacionais está relacionado, principalmente, com o número de Motores de Tracção em armazém e em condições de substituir o que foi retirado da locomotiva. Mesmo considerando algumas unidades em "stock", admite-se que o número médio de locomotivas em condições de operar é muito baixo, cerca de 50%. Uma razão possível poderá ser a falta de capacidade das secções de reparação (dos Turbo Compressores, Motores de Tracção, Rodados e Motores Diesel) para dar resposta ao número de avarias. Além disso, as distribuições empíricas para os tempos de reparação dos componentes, recolhidas na secção de reparação respectiva, têm um índice de dispersão muito grande.

Em futuros desenvolvimentos, pretende-se analisar uma possível restruturação do serviço, de modo a diminuir o tempo de reparação dos componentes. Finalmente, pretende-se considerar que as avarias podem ser devidas a mais do que um constituinte avariado, bem como admitir, ainda, a decomposição hierárquica, mais fina, dos componentes até agora considerados neste trabalho.

## Agradecimentos

Este trabalho foi financiado pela bolsa PRAXIS XXI/BD/19541/99

# 7 Bibliografia


1 Cunha, M. E., Lopes, J. A., Póvoa, A. P., *Modelo de Simulação para a gestão de um sistema multi-escalão de artigos reparáveis*, Investigação Operacional 21 (2001) 123-137.

2 Díaz, A., Fu, M. C., *Models for multi-echelon repairable item inventory systems with limited repair capacity*, European Journal of Operational Research 97 (1997) 480-492.

3 EXTEND, *Imagine That Inc.*, Versão 4.1.1. (1998).

4 Feeney, G. J., Sherbrooke, C. C., *The (s-1, s) inventory policy under compound Poisson demand*, Management Science 12 (1966) 391-411.

5 Graves, S. C., *A multi-echelon inventory model for repairable item with one-for-one replenishment*, Management Science 31 (1985) 1247-1256.

6 Guide Jr., V. D., Srivastava, R., *Repairable inventory theory: Models and applications*, Europian Journal of Operational Research 102 (1997) 1-20.

7 Law, A. M., Kelton, W. D., *Simulation Modeling & Analysis*, Third Edition, McGraw-Hill International Editions, Boston (2000).

8 Muckstadt, J. A., *A model for multi-item, multi-echelon, multi-indenture inventory system*, Management Science 32 (1973) 1567-1581.

9 Ross, S. M., *Introduction to probability models*, Sixth Edition, Academic Press, New York (1997).

10 Sherbrooke, C., *Optimal inventory modelling of systems: Multi-echelon techniques*, John Wiley & Sons, Inc, New York (1992).

11 Sherbrooke, C., *An evaluator for the number of operationally ready aircraft in a multi-level supply system*, Operations Research 19 (1971) 618-635.

12 Sherbrooke, C., *METRIC: A multi-echelon technique for recoverable item control*, Operational Research 16 (1968) 122-141.

13 Simon, R. M., *Stationary properties of a two-echelon inventory model for low demand items*, Operations Research 19 (1971) 761-773.

14 Slay, F. M., *VARI-METRIC: An approach to modelling multi-echelon resupply when the demand process is Poisson with a Gamma Prior*, Logistics Management Institute, Washington, D. C. Report AF301-3 (1984).