



## Uma revisão de literatura sobre as abordagens para análise de nível de reparo (LORA - Level Of Repair Analysis)

### A literature review on LORA (Level Of Repair Analysis)

Verônica Prottes Fecher<sup>1</sup>

Artur Alves Pessoa<sup>2</sup>

Eduardo Siqueira Brick<sup>3</sup>

**Resumo:** Esse trabalho tem por objetivo apresentar uma revisão de literatura sobre os trabalhos realizados na área de Análise de Apoio Logístico no processo de Análise de Nível de Reparo – LORA, campo de estudo recente em trabalhos acadêmicos, mas de grande importância dados os benefícios que podem ser alcançados em termos de redução de custos ou de aumento de disponibilidade do processo. Algumas abordagens são apresentadas de maneira a demonstrar os diversos enfoques realizados pelos autores e a evolução do tema na área ao longo dos anos, e uma definição de LORA mais genérica e abrangente é apresentada.

**Palavras-chave:** LORA, Disponibilidade Operacional, Análise de Apoio Logístico.

**Abstract:** This paper aims to present a literature review on the work carried out on Logistic Support Analysis about the process of Level of Repair Analysis – LORA, field of recent study in academic works, but of great importance given the benefits that can be achieved in terms of cost reduction or increased process availability. Some approaches are presented in a way that demonstrates the various views developed by the authors and the evolution of the topic in the area over the years, and a more general and broad definition of LORA is presented.

**Keywords:** LORA, Operational Availability, Logistic Support Analysis.

<sup>1</sup> UFF – Universidade Federal Fluminense

<sup>2</sup> UFF – Universidade Federal Fluminense

<sup>3</sup> UFF – Universidade Federal Fluminense

## 1. Introdução

Todas as organizações que utilizam bens de capital em seus processos produtivos enfrentam o mesmo problema quando esses ativos sofrem falhas e deixam de cumprir, total ou parcialmente, as funções a que se destinam. Para reduzir a frequência de falhas, ou para restaurar a condição de operacionalidade, quando ocorre a indisponibilidade de algum ativo, é preciso empreender ações de manutenção ou reparo, respectivamente. Essas ações requerem um sistema produtivo com essa finalidade específica, denominado sistema de manutenção, no meio civil, ou de apoio logístico, no jargão militar.

No projeto de sistemas de manutenção há dois objetivos a considerar: a disponibilidade dos ativos apoiados e a minimização do custo de vida útil, ou de posse, incorrido para se alcançar essa disponibilidade.

Para um dado conjunto de ativos a serem apoiados, a disponibilidade depende, em primeiro lugar, da confiabilidade desses ativos e da intensidade com que são usados, tanto em tempo de operação quanto das condições ambientais em que são usados, o que resulta em uma determinada quantidade de falhas que requerem ações de manutenção. Essas definem a demanda para o sistema de manutenção.

Em segundo lugar, a disponibilidade dos ativos depende do tempo gasto pelo sistema de manutenção para repô-los em condições de funcionamento. Este tempo define as características da oferta dos serviços de manutenção.

Evidentemente, quanto melhor e mais custoso o sistema de manutenção, menor o tempo de resposta para atender a demanda e maior a disponibilidade. Portanto, existem soluções de compromisso entre disponibilidade e custo de vida útil que podem ser exploradas por técnicas de otimização.

Sistemas de manutenção existem desde que o homem utiliza artefatos em seus processos produtivos. Entretanto, com o crescimento das organizações e a distribuição de suas unidades produtivas em extensas áreas geográficas, a complexidade e o custo desses sistemas têm aumentado significativamente.

Segundo a ABRAMAN – Associação Brasileira de Manutenção e Gestão de Ativos (Abraman, 2013) o custo da manutenção no Brasil em 2012 foi de cerca de 4,9% do faturamento total das empresas, ocupou cerca de 25 % da mão de obra e representou mais de R\$ 200 bilhões. Portanto é uma atividade com significativos impactos econômicos e, assim, o problema de projeto de sistemas de manutenção apresenta grande relevância para organizações que utilizam muitos ativos em unidades produtivas distribuídas geograficamente.

Este problema é particularmente importante para organizações militares com atuação mundial, como é o caso do Departamento de Defesa (DoD) dos EUA e não foi por acaso que a preocupação com a otimização de estruturas de apoio logístico teve aí a sua origem.

O DoD patrocinou o desenvolvimento e/ou adotou um grande número de metodologias dedicadas a resolver este problema. Elas são conhecidas como ferramentas para Análise de Apoio Logístico (LSA, do inglês *logistic support analysis*), notadamente: predição de confiabilidade (*reliability prediction*), análise de árvore de falhas (FTA – *fault tree analysis*), análise de modos, efeitos e criticidade de falhas (FMECA - *failure mode, effect and criticality analysis*), análise de tarefas de manutenção (MTA - *maintenance task analysis*), análise de custo de vida útil (LCCA - *life cycle cost analysis*) e análise de nível de reparo (LORA - *level of repair analysis*). Outras metodologias, tais como análise de manutenção centrada em confiabilidade (RCMA - *reliability centered maintenance analysis*),

engenharia de valor (VE – *value engineering*) e métodos concebidos para definir níveis de estoque de sobressalentes também são usados. Detalhes da integração que podem ocorrer entre essas diversas ferramentas nas modelagens de LORA serão apresentadas a posteriori. A figura 1 apresenta a seguir a estrutura do processo de Análise de Apoio Logístico.

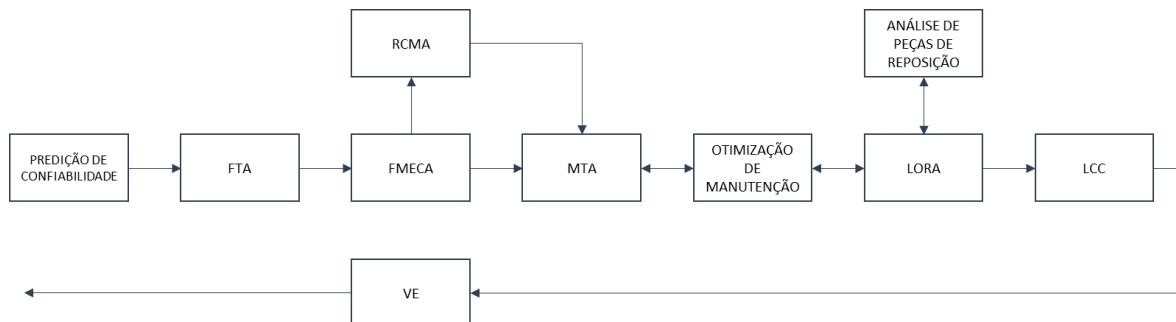


Figura 1– A estrutura de análise de apoio logístico. Adaptado de: Parada Puig e Basten, 2015.

Foi o DoD quem primeiro aplicou a metodologia de LORA – *Level of Repair Analysis* como parte integral do processo Análise de Apoio Logístico (LSA).

Este método foi assim definido no padrão militar do Departamento de Defesa (DoD) norte-americano MIL-STD-1390D em 1993:

“(…) LORA é uma parte integral da Análise de Apoio Logístico (MIL-STD-1388-1). As decisões de LORA influenciam o custo de apoio logístico, custo total do ciclo de vida de propriedade, e a prontidão operacional do sistema de hardware. Decisões de LORA são baseadas em considerações econômicas e não econômicas e objetivos de prontidão. Além do mais, as recomendações de LORA para novos materiais deveriam ser tomadas tão logo quanto o projeto preliminar do equipamento tenha sido determinado e atualizado ao longo da vida do sistema. (…)

O propósito de LORA é estabelecer o mínimo custo viável de nível de reparo ou alternativa de descarte para desempenhar ações de manutenção e para influenciar o projeto de equipamento naquela direção. As análises são baseadas em considerações econômicas e não econômicas e objetivos de prontidão”.

Outra definição mais abrangente de LORA é encontrada no MIL-HDBK-1390 de 2015, também do DoD:

“Uma metodologia analítica utilizada para auxiliar no desenvolvimento de conceitos de manutenção, influenciar o projeto e estabelecer o nível de manutenção em que os componentes serão substituídos, reparados ou descartados com base em restrições obtidas através de avaliações econômicas, não econômicas e de sensibilidade, bem como requisitos de preparação operacional.”

Apenas recentemente LORA tem sido abordada na literatura acadêmica. O quadro 1 abaixo sumariza as definições de LORA encontrados em alguns artigos publicados.

Quadro 1- Definições de LORA em alguns trabalhos realizados

Artigo	Definição de LORA
(Alfredsson, 1997)	A tarefa de determinar se um item deve ser tratado como descartável (consumível) ou um item reparável é chamada de análise de nível de reparo (LORA). Se o item é tratado como reparável, o objetivo é também determinar onde ele deveria ser reparado.
(Barros e Riley, 2001)	LORA é um domínio relativamente especializado neste amplo campo (sistemas de manutenção multi-escalão) e é uma ferramenta de projeto para ajudar engenheiros de pesquisa e desenvolvimento a avaliar o impacto de longo prazo de decisões de projeto iniciais sobre os custos de manutenção do ciclo de vida.
(Saranga e Kumar, 2006)	LORA é usado para desenvolver o conceito de manutenção inicial com base em restrições econômicas e não econômicas e requisitos de prontidão, e para determinar se uma ação de manutenção específica é econômica. Um dos principais objetivos da LORA é minimizar o custo do ciclo de vida do equipamento.
(Brick e Uchoa, 2009)	Dada uma instalação de ativos geograficamente distribuída, com um uso operacional definido durante o seu tempo de vida, projetar um sistema de apoio logístico para fornecer as disponibilidades dos ativos necessários, com um custo total mínimo de propriedade.
(Basten et al., 2009)	Dado um projeto de produto e uma rede de reparo, a análise de nível de reparo (LORA) determina para cada componente no produto (1) se ele deve ser descartado ou reparado após falha e (2) em que escalão na rede de reparo para fazer isso. O objetivo do LORA é minimizar os custos totais (variáveis e fixos).
(Basten et al., 2012)	(1) Quais componentes reparar sob falha e quais descartar; (2) em quais locais na rede de reparo desempenhar os reparos e descartes e; (3) em quais locais instalar recursos necessários para reparar, descartar ou mover componentes.
(Parada Puig e Basten, 2015)	O problema da análise de nível de reparo é de minimização de custos, o qual envolve duas decisões. Em primeiro lugar, determinar se um item significativo de manutenção deve ser reparado ou descartado após a falha. Em segundo lugar, determinar onde alocar essa tarefa de reparo / descarte na rede de reparo.
(Rawat e Lad, 2016)	Foca-se principalmente na otimização de decisões de nível de reparo, onde desempenhar a manutenção, quais níveis de endentação deveria ir para a manutenção e quais ações de manutenção (reparo/substituição/descarte) deveriam ser desempenhadas.

Como se pode ver nessas definições, o foco original de LORA é em decisões relacionadas a alternativas de descarte ou reparo das partes do sistema, e em que unidade de manutenção essas ações devem ser realizadas, sem consideração da localização geográfica dessas instalações. Ou seja, a decisão sobre a localização de unidades de manutenção era objeto de outros métodos de análise e a estrutura de apoio era considerada como um dado de entrada para LORA. A primeira abordagem sobre LORA, incluindo localização geográfica da demanda por ações de manutenção e de instalações para processá-las, apareceu no trabalho de Brick e Uchoa (2009), e sua definição pode ser vista no quadro 1.

Portanto, parece adequado uma adequação da definição de LORA, que seja mais abrangente e genérica do que as que vêm sendo usadas na literatura em função dos formatos em que a técnica tem sido apresentada.

Como já mencionado, as tomadas de decisão oriundas de LORA integram um processo que se preocupa com o desenho da estrutura de apoio logístico. Para o padrão do DoD, o principal objetivo do processo de LORA é determinar a mais efetiva estrutura de apoio e manutenção através de avaliações iterativas entre fatores econômicos e não econômicos do processo.

A preocupação com o desenho de uma estrutura de apoio logística que seja economicamente viável e atinja níveis alvo de disponibilidade dos ativos operacionais já vem de algum tempo. A modelagem de sistemas de estoques

ótimos tem sido estudada por diversos autores, sendo um de seus expoentes Sherbrooke, que apresentou em sua obra diversas técnicas de modelagem destes sistemas de apoio, considerando desde estruturas simples, com apenas uma instalação central de apoio e algumas bases (modelo METRIC), até estruturas mais complexas, que possuem estrutura de produto multi-endentada e vários escalões de manutenção (VARI-METRIC). A partir da validação destes modelos, diversos autores aperfeiçoaram aspectos do problema de LORA em seus trabalhos.

Este artigo se propõe a fazer uma revisão das abordagens sobre LORA encontradas na literatura e generalizar a definição de LORA, além de apresentar os trabalhos realizados de maneira a facilitar comparações entre os diferentes modelos utilizados para solucionar este problema.

Desta forma, este trabalho aborda na seção 2 a descrição do problema genérico de LORA e como ele aparece dentro da LSA, bem como sua interface com demais ferramentas do processo. Na seção 3 é apresentada uma tabela com as principais abordagens realizadas em alguns trabalhos de LORA, a qual pode fornecer *insights* sobre pontos de aproximação e limitações dos modelos. Na seção 4 são apresentadas as conclusões deste artigo.

## **2. Descrição do problema LORA**

O problema LORA pode ser abordado a partir de três perspectivas.

A primeira, que representa o lado da demanda por ações de manutenção, trata das questões relacionadas ao objeto dessas ações, que são os ativos físicos usados nos processos produtivos: os bens de capital que viabilizam esses processos.

A segunda, do lado da oferta de serviços de manutenção, trata das questões relacionadas ao sistema de manutenção que deve ser concebido para atender à demanda por ações de manutenção da maneira mais eficaz (que garanta a maior disponibilidade) e eficiente (que requeira o menor custo de vida útil) possíveis.

A terceira diz respeito à dinâmica de funcionamento do sistema, que inclui as regras de funcionamento do sistema de apoio, o fluxo de componentes no sistema e os tipos de decisões envolvidas, entre outros. A “física do problema”, como é chamada por Sherbrooke (1992), descreve o processo de funcionamento que ocorre em estrutura de manutenção dada uma pane em um componente de um ativo operacional.

### **2.1. A demanda por ações de manutenção**

A demanda por ações de manutenção decorre das características de confiabilidade dos ativos físicos utilizados nos processos produtivos, das condições ambientais nos locais onde estão instalados e da forma como são usados (tempo de operação, qualificação de usuários, etc.)

A teoria de confiabilidade e as metodologias de FTA e FMECA são utilizadas para determinar os modos de falha possíveis nesses sistemas e as frequências com que podem ocorrer.

Os métodos de MTA e RCMA identificam as ações de manutenção que podem ser demandadas em função das possíveis panes que os ativos podem sofrer ao longo de sua vida útil.

Os ativos físicos são normalmente modelados como uma estrutura em árvore, em que os componentes se relacionam por meio de uma relação pai-filhos. Essa estrutura é normalmente referida como endentada.

**Estrutura endentada:** Equivalente a uma representação gráfica do produto ou do sistema técnico em forma de “árvore”, diz respeito a como um sistema é construído/montado, desdobrando-o em subsistemas e módulos. Módulos pertencentes a subsistemas são chamados de itens “filhos”. Os itens “pai” são aqueles formados por demais componentes. Um exemplo ilustrado de um sistema endentado é apresentado na figura 2, com parte da árvore de componentes de uma aeronave, ilustrando como seriam os níveis da estrutura deste sistema.

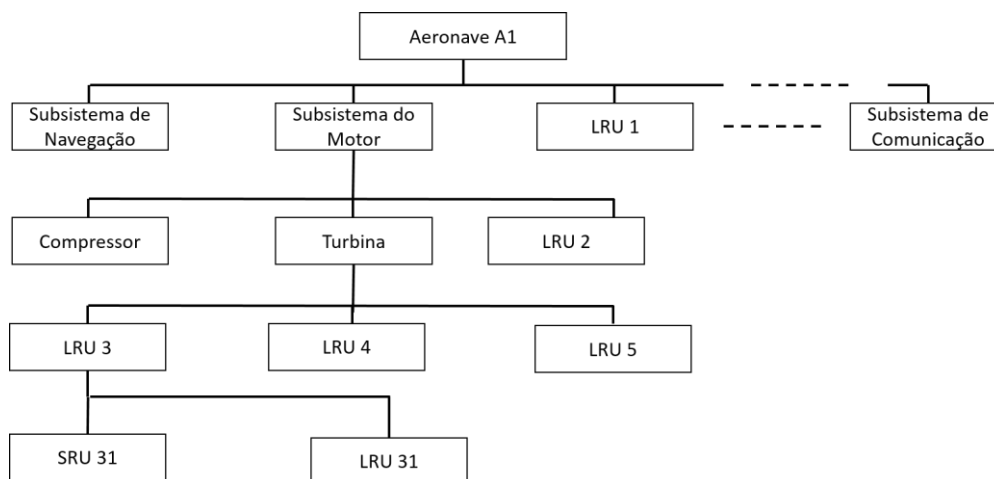


Figura 2- Exemplo da estrutura em forma de árvore de uma aeronave. Adaptado de: Brick e Uchoa (2009)

**LRU:** Line-replaceable units. São considerados os componentes, ou os subsistemas de um sistema que podem ser substituídos em linha. Essa substituição é necessária para retornar o sistema a um estado de operação. Podem ser considerados também como os itens “pais”, pois são compostos de diversos outros componentes, considerados de níveis de “endentação” mais baixos. O problema de definição de quais itens dentro dos sistemas operacionais serão considerados LRU ponderam custo e disponibilidade do sistema de maneira a minimizar o custo total de substituição dos itens e o investimento em ativos adicionais (Parada Puig e Basten, 2015).

**SRU:** shop-replaceable units. Considerados como componentes dos subsistemas que não são substituídos em linha perante uma falha, dada a não existência de recursos suficientes para realização de análise ou substituição nos locais de operação. São também considerados itens que compõem uma LRU. Uma LRU pode conter SRU's, mas uma SRU não contém LRU's.

**Estrutura de única endentação:** alguns modelos consideram apenas o primeiro nível da estrutura do produto (item “pai”) para realização do reparo por substituição. A Força Aérea Americana utiliza o conceito de item de primeira endentação como LRU – Line-replaceable unit.

**Estrutura multi-endentada:** considera-se no modelo o ativo operacional desdobrado em seus vários níveis (LRU's e SRU's). Neste caso, o modelo realiza uma ação sobre a LRU considerando a dependência estrutural e o consequente impacto das taxas de falha de seus componentes filhos, que acarreta na alteração dos tempos de reparo e na fila de componentes em reparo.

## 2.2. A oferta de serviços de manutenção

O objetivo do LORA é projetar um sistema de apoio para atender à demanda por diferentes tipos de ações de manutenção.

**Reparo total:** não considera o reparo de subcomponentes retirados durante ação de reparo, passíveis de serem submetidos a decisão de reparo/descarte em outra ação.

**Reparo Parcial:** Considera que outras ações de reparo podem ser aplicadas aos subcomponentes retirados de uma LRU, tais como reparo no mesmo escalão ou em um escalão superior, ou descarte de componentes.

**Descarte:** Alguns modelos consideram que os itens não são 100% reparáveis, com uma probabilidade conhecida de que a falha não será reparada. Há também casos em que o reparo não é vantajoso, como no caso de componentes de subsistemas com baixo valor de custo de estoque ou com facilidade de obtenção.

**Movimentação:** a movimentação de itens entre escalões pode ser incorporada no modelo uma vez que isso pode influenciar nos tempos totais de reparos dos itens. Em geral, a movimentação das peças segue um tempo determinístico.

**Substituição:** A substituição dos itens pode ocorrer em LRU's de diferentes níveis de endentação. Alguns modelos incorporam a substituição apenas das LRU's que estão nos primeiros níveis, mas outros modelos também incorporam outras componentes de níveis mais baixos na estrutura do produto.

Da mesma forma que os ativos físicos que geram a demanda, o sistema de manutenção costuma ser projetado na forma de uma estrutura em árvore.

**Base:** Também chamada de primeiro escalão, trata-se dos sites em que são feitas as substituições das peças e em alguns casos, se houver recursos disponíveis para tal, os reparos em nível local relativamente aos sistemas operativos. Por exemplo, o primeiro escalão relativo a um submarino é o próprio submarino, no qual as peças mais importantes são guardadas para reposição, caso necessário.

**Intermediário:** Em algumas literaturas chamado também de nível regional ou segundo escalão, trata-se de um nível de localização de instalações de estoque de itens estabelecido entre o depot (central) e a base (local).

**Depot:** Instalação central no nível mais alto do sistema de fornecimento de peças e reparos.

**Multi-Escalão:** estrutura de manutenção constituída de vários escalões, como o nível Local (Base), Intermediário (Regional) ou Central (Depot). Existem estruturas que consideram o fabricante do equipamento também como um escalão (no caso, o de maior nível). Um exemplo de estrutura aparece como na figura 3 abaixo.

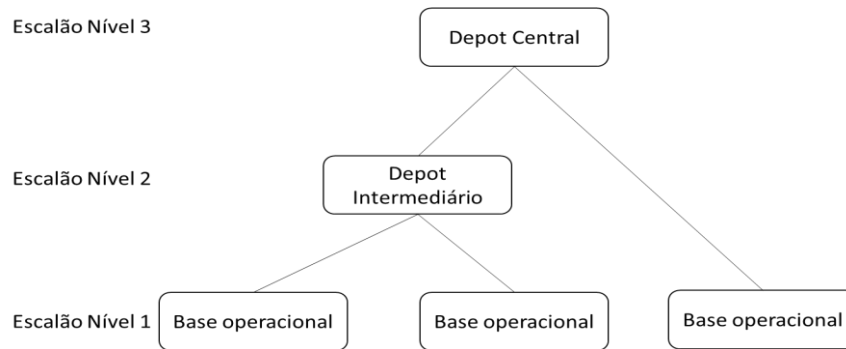


Figura 3– Modelo de rede de reparo com 3 escalões. O escalão mais baixo refere-se ao nível onde operam os ativos, enquanto os demais escalões comportam operações de reparo e estoque. Adaptado de: Basten et. al.(2011)

**Não-capacitado:** um problema não-capacitado é aquele em que as instalações não possuem restrições ao atendimento das demandas.

**Capacitado:** cada instalação de reparo possui capacidade limitada, não podendo atender mais requisições de demanda do que sua capacidade permite. Geralmente esses sistemas são modelados utilizando o modelo de fila M/M/s.

### 2.3. Premissas de atendimento às demandas

**Distribuição de probabilidade do número esperado de *backorders*:** como o número de backorders esperado é uma função do número de unidades de peças na fila de reparo em um determinado momento no tempo, utiliza-se o Teorema de Palm, o qual prova que se a demanda de um item segue um processo de Poisson e o tempo médio de reparo de cada item é independente e identicamente distribuído de acordo com uma distribuição com média  $T$  anos, a distribuição do número de unidades de peças na fila de reparo também seguirá uma distribuição de Poisson.

**Eficácia do reparo:** Há duas interpretações comuns nos modelos da literatura relativas à eficácia de um reparo;

- Probabilidade de retornar o item à sua funcionalidade, sem considerar seu envelhecimento (quando a taxa de falha é crescente);
- Probabilidade de retornar o item à condição de novo (as good as new); geralmente, neste tipo de modelagem, é utilizada a distribuição de Poisson para a fila de unidades de peças em reparo, uma vez que dado um item retornar a sua condição original as condições do experimento permanecem constantes no decorrer do tempo. Quando estas condições variam, ou seja, quando a média da taxa de falhas varia ao longo do tempo (por ex.: pelo fenômeno de desgaste das peças), é mais indicado o uso da distribuição binomial negativa.

**Política de estocagem ( $s-1, s$ ):** Seja  $s$  a quantidade de itens em estoque de um dado componente. Como o problema de LORA é comumente aplicado a itens reparáveis com alto custo e baixa taxa de falhas, ou seja, baixa demanda na base, a quantidade para o lote econômico de reparo se aproxima de 1. Por causa deste reparo um a um (ou seja, no momento em que a componente sofre a pane) o ponto de ressuprimento, ou a posição do ativo em que um item é enviado para reparo, é  $s-1$ .



## 2.4. Dinâmica de funcionamento de sistemas de manutenção

A situação pode ser descrita da seguinte maneira: quando uma pane ocorre, é necessário detectar qual é o componente falho para que haja uma substituição deste por um sobressalente em funcionamento. Aqui duas situações podem ocorrer; se houver uma peça para pronta substituição, a troca é realizada e o componente defeituoso é enviado para análise nos locais de manutenção apropriados, de maneira centralizada ou descentralizada, dependendo do projeto da estrutura de manutenção. Após análise do componente, seu destino é definido: este pode ser reparado ou descartado. Se não houver uma peça para pronta substituição na base de operação, é solicitada uma peça para a instalação de reparo responsável pelo atendimento daquela base. Se, além disso, não houver uma peça disponível em estoque no depot ou em um estoque intermediário, o pedido fica pendente, gerando um *backorder*, e o equipamento fica indisponível durante todo o tempo em que ocorrer a falta da peça de reposição.

É fácil ver que um *backorder* impacta a disponibilidade dos ativos, sendo este o motivo de diversas modelagens abordarem a minimização dos pedidos pendentes de maneira a buscar a maximização da disponibilidade operacional do sistema em geral. Na literatura pesquisada, em geral, os modelos consideram alguns tipos de decisão a serem tomadas no processo de modo a otimizar a estrutura de apoio considerando objetivos de tempo ou custo. Essa “física do problema”, genérica, assume características próprias em cada modelagem, variando conforme a estrutura do sistema técnico, a estrutura de manutenção, premissas relativas ao atendimento da demanda e tipos de ações requeridas para as peças que sofreram pane.

A figura 4 ilustra os diversos tipos de decisões que podem ocorrer numa modelagem envolvendo o problema de LORA de acordo com a literatura atual.

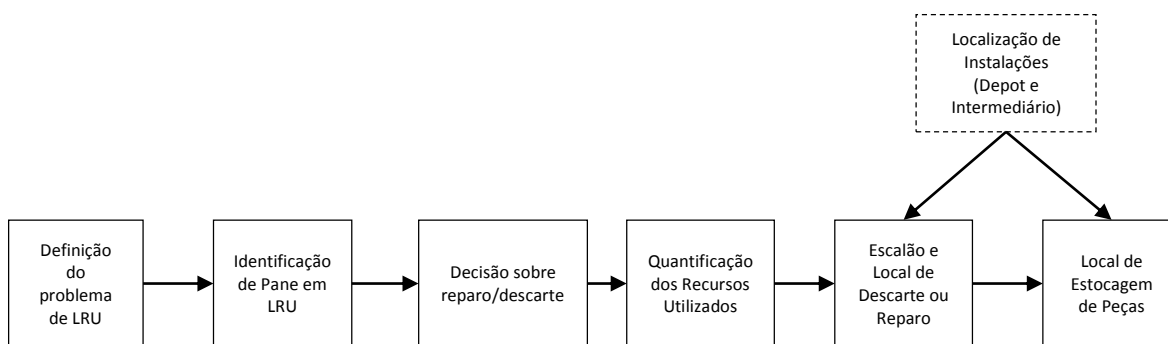


Figura 4 - Processos de decisão envolvidos na modelagem do problema de LORA. Fonte: Autores.

Aqui cabe ressaltar que algumas destas etapas encontram-se em outros processos da estrutura de Análise de Apoio Logístico, mas devido aos desenvolvimentos na área da modelagem tais aspectos podem ser incluídos ou não em um modelo de otimização, que será mais ou menos complexo dependendo de quais destas decisões estiverem presentes no modelo.

O problema de definição de LRU na primeira caixa aparece na figura 1 dentro da *Maintenance Optimization* ou otimização de manutenção de multicomponentes, que trata de não somente definir quando um componente de um ativo deve ser substituído, mas qual deles. Um exemplo clássico grosseiro para essa definição é decidir, quando uma vela de um carro dá defeito, se é mais prático trocar o motor, a vela ou o carro. Ou seja, dada uma estrutura de um

ativo operacional, qual das peças deve ser trocada após uma pane? Esta decisão deve considerar aspectos práticos e de ordem econômica, e Parada Puig e Basten(2015) abordam esse problema apresentando dois estudos de casos. Para se definir qual destes sistemas, subsistemas ou componentes devem ser substituídos, antes é necessário realizar a MTA (análise de tarefa de manutenção) que considera todos os recursos (humanos, materiais e tempo) que são necessários para a manutenção de cada componente, bem como a análise de acessibilidade aos equipamentos e da melhor forma de desmontagem/montagem dos equipamentos.

A quantificação dos recursos utilizados pode variar nos modelos. Alguns consideram esses recursos como os necessários para a realização das tarefas de manutenção, podendo abranger ou não, por exemplo, a ação de descarte de itens defeituosos. A análise sobre tal decisão também é necessária. Quantificar os recursos tem a ver com aloca-los ao longo da estrutura de apoio/manutenção dos ativos. Para utilizar os recursos necessários como dados de entrada também é necessário que seja feita anteriormente a etapa de MTA.

Quanto às decisões de locais de reparo e descarte e de estoque de sobressalentes, estas envolvem como saída o custo de ciclo de vida dos ativos (*Life Cycle Cost*) ou possuem este parâmetro como restrição do modelo. A tomada de decisões de alocação de recursos ou estoques geralmente é feita considerando uma estrutura fixa. A figura 2 apresenta a decisão de localização de instalações em um retângulo pontilhado, pois esse é um formato de modelagem mais recente, em que alguns trabalhos une a modelagem de LORA a modelos de localização de instalações, dando liberdade ao modelo em definir não somente onde colocar recursos (englobando estoques) e quantos deles, mas onde instalar os locais de reparos.

### 3. Análise dos modelos na literatura

No quadro 2 a seguir serão apresentadas as abordagens de LORA realizadas pelos principais autores, seguindo uma estrutura cronológica de apresentação. Este quadro foi dividido nas informações das categorias acima citadas mais informações acerca da modelagem e das tomadas de decisão geradas como *outputs* do modelo. Para melhor entendimento das informações, a coluna “Decisões” apresenta algumas destas abreviações de acordo com as variáveis do modelo, apresentadas abaixo:

- **DRD – Decisões de Reparo/Descarte:** O modelo apresenta como saídas decisões sobre as LRU's ou SRU's, se serão descartadas ou reparadas e, em alguns casos, movidas para o próximo escalão para tomada de decisão posterior. Dentro deste tipo de decisão também se encontra a definição dos locais onde estas ações devem ocorrer no sistema de apoio.
- **PAR – Problema de Alocação de Recursos:** Consiste em definir os locais e quantidades de recursos utilizados para a manutenção dos ativos.
- **PAPR – Problema de alocação de peças de reposição:** O modelo apresenta como saída as decisões sobre quantas peças de reposição devem ser alocadas na rede de reparo, bem como os locais onde serão dispostas.

- **PLF** – Problema de Localização de Facilidades: As decisões no modelo incluem definir, em uma estrutura de manutenção quais os locais ótimos para instalação das facilidades de apoio. Os escalões podem ou não ser pré-fixados no modelo.
- **PDLRU** – Problema de definição de LRU: Consiste em definir o que deve ser considerado como LRU ou não. De maneira geral o modelo irá considerar fatores econômicos no modelo para a tomada de decisão.

A estrutura do sistema de manutenção e a do produto serão acompanhados das palavras *fixa* – quando a estrutura já é um input para o processo de otimização, e *aberta* – quando a estrutura será definida como um output do processo. A coluna “Ações de Manutenção Consideradas” define a presença de variáveis de decisão que consideram o reparo, descarte ou a movimentação dos itens ao longo da estrutura do sistema de apoio. Se uma estrutura for classificada como multi-endentada ou multi-escalão sem a definição do número respectivo, isso significa que o modelo permite um número arbitrário de endentações ou escalões, respectivamente, ou que houve testes de instancias com vários níveis diferentes destas categorias.

Quadro 2 – caracterização das abordagens de LORA por ordem cronológica dos trabalhos realizados na área

Artigo	Demanda por ações de manutenção	Oferta de serviços de manutenção			Decisões	Função objetivo e características da modelagem
		Premissas sobre a estrutura do sistema de apoio	Ações de manutenção consideradas	Premissas para o atendimento das demandas		
(Alfredsson, 1997)	- Estrutura com 1 nível de endentação (fixo) - apenas LRU's - Processos de demanda: Poisson	- Estrutura com 2 escalões (fixo) - Sistema capacitado (fila M/M/s) - Política de estocagem (s-1,s)	- REPARO	- Apenas de LRU's nos locais de operação - Eficácia de reparo: 100% - as good as new	-PAPR - PAR - DRD	- maximiza a disponibilidade (minimiza o número de backorders) dos ativos sujeito a restrições de custo. - modelo de programação não linear inteira. Função objetivo convexa, com aplicação de algoritmo para otimização baseado na ideia de convexificação e pontos eficientes
(Barros, 1998)	- Estrutura com dois níveis de	- Estrutura multi-escalão	-REPARO -DESCARTE	-LRU's e SRU's	- DRD	-minimiza o custo total de manutenção ao

	<p>endentação (fixo) - LRU's e SRU's -Processos de demanda: Poisson</p>	<p>(local, reparo intermediário e reparo no depot) (fixo) -Sistema não-capacitado - Política de estocagem (s-1,s)</p>		<p>-Eficácia de reparo: 100% - as good as new</p>		<p>longo do ciclo de vida dos ativos. - LOROM – modelo de otimização de nível de reparo (modelo de programação inteira) Obs.: utiliza pacote de previsão de falhas para alimentar dados como MTBF e MTTR dos componentes</p>
<p>(Barros e Riley, 2001)</p>	<p>- Estrutura com dois níveis de endentação (fixo) - LRU's e SRU's -Processos de demanda: Poisson</p>	<p>- Estrutura multi-escalão (local, reparo intermediário e reparo no depot) (fixo) -Sistema não-capacitado - Política de estocagem (s-1,s)</p>	<p>-REPARO -DESCARTE</p>	<p>-LRU's e SRU's -Eficácia de reparo: 100% - as good as new</p>	<p>-DRD</p>	<p>-minimiza o custo total de manutenção ao longo do ciclo de vida dos ativos. - LOROM – modelo de otimização de nível de reparo (modelo de programação inteira) Obs.: adiciona heurística gulosa ao branch-and-bound para reduzir o tempo de busca da solução inteira, obtendo limites inferiores e superiores ajustados para as soluções, de maneira a aperfeiçoar o trabalho anterior</p>
<p>(Richard Cassady et al., 2001)</p>	<p>-Estrutura com dois níveis de endentação (fixo) - LRU's -Processos de demanda: Weibull</p>	<p>-Estrutura de 1 escalão (reparos em nível local) (fixo) - Sistema não-capacitado</p>	<p>As alternativas aqui são entre tipos de reparo que englobam manutenção preventiva, corretiva e preditiva.</p>	<p>-LRU's -Eficácia de reparo: desgaste nas peças é considerado</p>	<p>- DRD</p>	<p>- maximiza a confiabilidade do ativo operacional através das escolhas alternativas de manutenção. - modelo de programação linear inteira.</p>

(Saranga e Kumar, 2006)	- Estrutura multi-endentada (fixa) - 1 LRU, SRU's e peças das SRU's - Processos de demanda: Qualquer, mas independent e da demanda (usado apenas para dimensionar estoque de sobressalent es usando o teorema de Palmer	- Estrutura multi-escalão (base, intermediário e depot) - Sistema não capacitado	-REPARO -DESCARTE	- 1 LRU, SRU's e peças das SRU's -Eficácia de reparo: 100% -Pode ser "as good as new" ou não	-DRD	- minimiza o custo total de manutenção por hora de voo associado às opções de reparo existentes. -modelo de programação linear inteira. Obs.: utiliza para a otimização o software Evolver – pacote que aplica o Algoritmo Genético – para encontrar as melhores soluções do problema.
(Basten et al., 2009)	- Estrutura multi-endentada, podendo atingir vários níveis (fixa) - LRU's e SRU's	- Estrutura multi-escalão, podendo atingir vários níveis (fixa) - Sistema não-capacitado	-REPARO -DESCARTE - MOVIMENTAÇÃO	- LRU's e SRU's - Eficácia de reparo: 100% - as good as new	- DRD	-minimiza o custo total de manutenção anual dos ativos - modelo de programação linear inteira. Adaptado dos desenvolvimentos de Saranga e Kumar (2006) e Barros (1998), gera um modelo genérico com melhorias e com a relaxação de algumas restrições de integralidade, tornando a resolução do problema computacionalmente mais fácil.
(Brick e Uchoa, 2009)	- Estrutura multi-endentada, podendo atingir vários	- Estrutura multi-escalão, podendo atingir vários	-REPARO -DESCARTE	- LRU's e SRU's - Eficácia de reparo: 100%	- DRD - PAR - PLF	- minimiza o custo total de manutenção dos ativos mais o custo de instalação dos

	níveis (variável) - LRU's e SRU's - Processo de demanda: Poisson	níveis (variável) - Sistema capacitado (mas pode atender em algumas situações capacidade ilimitada)		- as good as new		recursos em uma dada instalação de reparo. - modelo de programação linear inteira mista.
(Basten et al., 2011)	- Estrutura multi-endentada (o modelo permite vários níveis) (fixo) - LRU's e SRU's - Processo de demanda: Poisson	- Estrutura multi-escalão (o modelo permite qualquer número) (fixo) - Sistema capacitado	-REPARO -DESCARTE - MOVIMENTAÇÃO	- LRU's e SRU's - Eficácia de reparo: associada a uma probabilidade de de insucesso. - quando reparado, as good as new	- DRD -PAR	-minimiza o custo total de manutenção anual dos ativos - Reformula o problema de LORA como um modelo de fluxo de custo mínimo.
(Basten et al., 2012)	- Estrutura de única endentação (fixo) - LRU's - Processo de demanda: Poisson	- Estrutura de 2 escalões (base e depot) (fixo) - Sistema não capacitado	-REPARO -DESCARTE - MOVIMENTAÇÃO	- LRU's - Eficácia de reparo: 100% - "as good as new"	- DRD -PAR -PAPR	- minimiza o custo total de manutenção e de posse das peças de reposição. - Trata o a restrição não linear de disponibilidade através de um algoritmo que considera análise marginal e pontos eficientes.
(Fan et al., 2013)	- Estrutura de 1 endentação (fixa) - LRU's - Processos de demanda: Exponencial	- Estrutura multi-escalão (3 escalões) - Sistema não-capacitado	-REPARO	-Apenas LRU's nos locais de operação - Eficácia de reparo: 100% - as good as new	- DRD - PAPR	- minimiza o número de backorders ao longo do sistema. A função objetivo relaciona estes pedidos pendentes ao tempo de espera por peças de reposição. - modelo de programação não-linear inteiro. Os autores utilizam um algoritmo para transformar a

						função objetivo que não é convexa em uma alternativa que é convexa para desta forma realizar a otimização da função EBO.
(Parada Puig e Basten, 2015)	- Estrutura multi-endentada (aberta) -LRU's devem ser definidos entre todos os possíveis componentes -Processos de demanda: Poisson	- Estrutura de 2 escalões (base e depot), e 1 ponto de estoque de peças (fixo) -Sistema não-capacitado - Política de estocagem (s-1,s)	- REPARO	- Apenas de LRU's nos locais de operação -Eficácia de reparo: 100%	- PDLRU	- minimiza o custo total de substituição de item e o investimento em ativos adicionais, dada uma restrição sobre a disponibilidade da frota de ativos. - modelo de programação linear inteira mista.
(Guo et al., 2015)	- Estrutura com 2 níveis de endentação (fixo) - LRU's e SRU's -Processos de demanda: Exponencial	- Estrutura multi-escalão (base, intermediário e depot) (fixo) - Sistema não capacitado - Política de estocagem (s-1, s)	- REPARO	- LRU's e SRU's - Eficácia de reparo: 100% - as good as new	- DRD - PAPR	- minimiza o número de backorders ao longo do sistema. A função objetivo relaciona estes pedidos pendentes ao tempo de espera por peças de reposição. - modelo de programação não-linear inteiro. Os autores utilizam um algoritmo para transformar a função objetivo que não é convexa em uma alternativa que é convexa para desta forma realizar a otimização da função EBO.
(Rawat e Lad, 2016)	- Estrutura com 3 níveis de endentação	- Estrutura multi-escalão (base,	- REPARO - DESCARTE	- LRU's e SRU's	-DRD - projeto de confiabilidade de ótimo	- minimiza o VP do custo do ciclo de vida do sistema de

---

(montagem, módulo e componente) (fixo) - 1 LRU e SRU's - Processos de demanda: Poisson	depot e OEM – fabricante) (fixo) - sistema capacitado (fila com um único servidor)	- MOVIMENTAÇÃO	- Eficácia de reparo: 100% - as good as new	associado às decisões de reparo e descarte	manutenção considerando a decisão de projeto de confiabilidade e de LORA. -modelo de programação linear inteira.
--	---	-------------------	--	--	---

---



Como se pode observar, a maior parte da literatura de LORA inicialmente focou-se nas decisões básicas de reparo e descarte e em modelos abordaram exclusivamente o problema de LORA puro, vindo depois a localização de recursos para reparo como equipamentos analisadores e testadores. Os novos desenvolvimentos de modelos começaram a envolver partes novas do processo de Análise de Apoio Logístico, que até então eram tratadas de maneira sequencial, o que gerava soluções sub ótimas de acordo com a análise dos autores.

O primeiro desenvolvimento nesta área que une processos anteriormente executados de maneira sequencial é a resolução do problema de LORA conjuntamente ao problema de alocação de peças de reposição. Este problema tem sido abordado na literatura principalmente através do artigo seminal de Sherbrooke (1968) em que é desenvolvido o modelo METRIC (Multi-Echelon Technique for Recoverable Item Control). O modelo é estendido por Muckstadt (1973) permitindo dois níveis de endentação, o modelo chamado MOD-METRIC. Esse modelo é tratado por Graves (1985) que propõe uma aproximação mais acurada para o modelo de 2 níveis de endentação e 1 escalão, chamado VARI-METRIC, e Sherbrooke (1986) estende o modelo para abranger dois escalões ao invés de apenas um. Essas são as principais técnicas utilizadas para trabalhar normalmente o problema de LORA conjuntamente com o problema de alocação de peças de reposição.

Outra parte da LSA tratada de maneira conjunta com os modelos de LORA é o problema de localização de facilidades. Artigos que tratam de pesquisas nesta área que podem ser consultados são os de ReVelle e Eiselt (2005), Wu et al. (2006), ReVelle et al.(2008) e Brick e Uchoa (2009). O problema de definição de LRU, tratado conjuntamente com LORA em Parada Puig e Basten (2015), é uma decisão que se encaixa dentro do processo de otimização de manutenção, na medida em que informa não somente quando realizar manutenção mas também quais partes do sistema devem passar por estas ações. Para esta análise há o processo de análise de tarefa de manutenção que irá contemplar aspectos de fatores humanos (B.S. Dhillon and Y. Liu, 2006) e de sequência ótima de montagem e desmontagem de equipamentos (Lambert, 2003), para então proceder a otimização de manutenção de sistemas multicomponentes como em Nicolai e Dekker (2008), como pode ser considerado no caso de um sistema multi-endentado.

O último processo de tomada de decisão que se vê realizado de forma simultânea a LORA é aquele de projeto de confiabilidade encontrado em Rawat e Lad (2016). O projeto de confiabilidade de um sistema de manutenção é um tema largamente explorado e pode ser melhor entendido nos trabalhos de Markeset e Kumar (2003), Nepal et al. (2007) e no livro de Moubray(1997).

Desta forma pode-se perceber a aplicação de modelagens de LORA conjunta a outras partes do processo de análise de apoio logístico, o que anteriormente e até em anos recentes foi feito apenas em abordagens únicas e sequenciais dos problemas. Esse tem sido um passo dado preferencialmente pelos pesquisadores, tratando mais da complexidade de decisões simultâneas do que apenas com o tamanho das instâncias. Dada a variedade de tratamentos dados ao problema de análise de nível de

reparo, e dado que o problema não tem sido tratado de maneira isolada, uma definição mais abrangente e genérica para LORA poderia ser:

“Dado um conjunto de ativos utilizados em unidades produtivas distribuídas geograficamente, com um uso definido durante sua vida útil, dimensionar um sistema de manutenção com um mínimo custo de vida útil, sujeito a restrições de disponibilidades mínimas desejadas para esses ativos”.

Uma definição alternativa e complementar poderia ser:

“Dado um conjunto de ativos utilizados em unidades produtivas distribuídas geograficamente, com um uso definido durante sua vida útil, dimensionar um sistema de manutenção capaz de prover a máxima disponibilidade possível para esses ativos, sujeito a uma restrição de custo de vida útil”.

Nessas definições, dimensionar significa determinar a localização geográfica e características das unidades de manutenção necessárias, os recursos que elas devem ter (instalações, recursos humanos, bens de capital, estoques de partes sobressalentes e itens consumíveis, software, etc.) e as ações de manutenção que elas estarão habilitadas a executar, para cada combinação de componentes constituintes dos ativos apoiados, locais das unidades operativas onde esses ativos estarão operando e a intensidade dessa operação (duração, condições ambientais que afetem a confiabilidade, etc.). Isso torna a definição ainda mais genérica uma vez que o problema de LORA pode ser combinado com qualquer outra tomada de decisão envolvida em qualquer processo da LSA.

#### **4. Conclusão**

Este trabalho apresentou as principais abordagens e autores nos trabalhos de LORA de maneira a clarificar o estado atual da pesquisa na área. O tema, embora ainda tratado de maneira escassa, apresenta um campo de grande potencial visto a possibilidade de combinação de diversos tipos de tomadas de decisão geradas pelos modelos e pela possibilidade de aplicação de várias ferramentas de otimização na resolução do problema.

Neste trabalho também foram explicados alguns termos que são utilizados de maneiras diversificadas pelos autores das pesquisas. Neste ponto, há ainda a oportunidade de em trabalhos futuros criar uma nomenclatura que possa ser utilizada de maneira padronizada, visto que existe variação no uso dos termos encontrados nos trabalhos realizados na literatura de LORA.

Uma definição mais abrangente do nível de análise de reparo foi sugerida neste trabalho de maneira a contextualizá-la com as diversas abordagens que tem sido feitas nas pesquisas recentes. Embora haja semelhanças nas definições, o conceito é tratado de maneira variável em função dos tipos de decisões resultantes do modelo.

## 5. Referências bibliográficas

ALFREDSSON, P. 1997. Optimization of multi-echelon repairable item inventory systems with simultaneous location of repair facilities. *European Journal of Operational Research*, Eleventh EURO Summer Institute: Operational Research Models in Maintenance. v. 99, n. 3, 584–595.

BARROS, L. L. 1998. The optimization of repair decision using life-cycle cost Parameters. *IMA Journal of Management Mathematics*, v. 9, n. 4, 403–413.

BARROS, L.; RILEY, M. 2001. A combinatorial approach to level of repair analysis. *European Journal of Operational Research*, A Global View of Industrial Logistics. v. 129, n. 2, 242–251.

BASTEN, R. J. I.; SCHUTTEN, J. M. J.; HEIJDEN, M. C. VAN DER. 2009. An efficient model formulation for level of repair analysis. *Annals of Operations Research*, v. 172, n. 1, 119.

BASTEN, R. J. I.; VAN DER HEIJDEN, M. C.; SCHUTTEN, J. M. J. 2011. Practical extensions to a minimum cost flow model for level of repair analysis. *European Journal of Operational Research*, v. 211, n. 2, 333–342.

BASTEN, R. J. I.; VAN DER HEIJDEN, M. C.; SCHUTTEN, J. M. J. 2012. Joint optimization of level of repair analysis and spare parts stocks. *European Journal of Operational Research*, v. 222, n. 3, 474–483.

BRICK, E. S.; UCHOA, E. 2009. A facility location and installation of resources model for level of repair analysis. *European Journal of Operational Research*, v. 192, n. 2, 479–486.

B.S. DHILLON; Y. LIU. 2006. Human error in maintenance: a review. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, v. 12, n. 1, 21–36.

Documento Nacional 2013. In: 28º Congresso Brasileiro de Manutenção e Gestão de Ativos. Salvador: BA, set. 2013. Disponível em: <<http://www.abraman.org.br/sidebar/documento-nacional/resultado-2013>> Acesso em: 14/12/2107.

GRAVES, S. C. A. 1985. Multi-Echelon Inventory Model for a Repairable Item with One-for-One Replenishment. *Management Science*, v. 31, n. 10, 1247–1256.

GUO, L. FAN, J., WEN, M., KANG, R. 2015. Joint optimization of LORA and spares stocks considering corrective maintenance time. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, v. 26, n. 1, 85–95.

LAMBERT, A. J. D. 2003. Disassembly sequencing: A survey. *International Journal of Production Research*, v. 41, n. 16, 3721–3759.

MIL-STD-1390 D. 1993. *Military Standard: Level of Repair Analysis*, US Navy.

MIL-STD-1390 D. 2015. *Military Standard: Level of Repair Analysis*, US Navy.

MOUBRAY, J. 1997. *Reliability-centered Maintenance*. New York, Industrial Press Inc.

MUCKSTADT, J. A. 1973. A Model for a Multi-Item, Multi-Echelon, Multi-Indenture Inventory System. *Management Science*, v. 20, n. 4–part-i, 472–481.

- NEPAL, B.; MONPLAISIR, L.; SINGH, N. 2007. A framework to integrate design for reliability and maintainability in modular product design. *International Journal of Product Development*, v. 4, n. 5, 459–484.
- NICOLAI, R. P.; DEKKER, R. 2008. Optimal Maintenance of Multi-component Systems: A Review. In: *Complex System Maintenance Handbook. Springer Series in Reliability Engineering*. Springer London.
- PARADA PUIG, J. E.; BASTEN, R. J. I. 2015. Defining line replaceable units. *European Journal of Operational Research*, v. 247, n. 1, 310–320.
- RAWAT, M.; LAD, B. K. 2016. Simultaneous selection of reliability design and level of repair for fleet systems. *International Journal of System Assurance Engineering and Management*, v. 7, n. 2, 138–155.
- REVELLE, C. S.; EISELT, H. A. 2005. Location analysis: A synthesis and survey. *European Journal of Operational Research*, v. 165, n. 1, 1–19.
- REVELLE, C. S.; EISELT, H. A.; DASKIN, M. S. 2008. A bibliography for some fundamental problem categories in discrete location science. *European Journal of Operational Research*, v. 184, n. 3, 817–848.
- RICHARD CASSADY, C.; PAUL MURDOCK, W.; POHL, E. A. 2001. Selective maintenance for support equipment involving multiple maintenance actions. *European Journal of Operational Research: A Global View of Industrial Logistics*. v. 129, n. 2, 252–258.
- SARANGA, H.; KUMAR, U. D. 2006. Optimization of aircraft maintenance/support infrastructure using genetic algorithms—level of repair analysis. *Annals of Operations Research*, v. 143, n. 1, 91.
- SHERBROOKE, C. C. 1968. Metric: A Multi-Echelon Technique for Recoverable Item Control. *Operations Research*, v. 16, n. 1, 122–141.
- SHERBROOKE, C. C. 1986. VARI-METRIC: Improved Approximations for Multi-Indenture, Multi-Echelon Availability Models. *Operations Research*, v. 34, n. 2, 311–319.
- SHERBROOKE, C. C. 1992. *Optimal Inventory Modeling of Systems: Multi-Echelon Techniques*. New York, Wiley.
- TORE MARKESET; UDAY KUMAR. 2003. Design and development of product support and maintenance concepts for industrial systems. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, v. 9, n. 4, 376–392.
- WU, L.-Y.; ZHANG, X.-S.; ZHANG, J.-L. 2006. Capacitated facility location problem with general setup cost. *Computers & Operations Research*, v. 33, n. 5, 1226–1241.