



## **Princípios de redução de risco na modelagem de substituição em grupo sob o enfoque da teoria da utilidade**

**Diego Camilo Ferreira Sousa**

Universidade Federal de Pernambuco - CAA  
Rodovia BR-104, Km 59, s/n – Nova Caruaru, Caruaru – PE, 55002-970  
eng.diegocamilo@gmail.com

**Rodrigo Sampaio Lopes**

Universidade Federal de Pernambuco - CAA  
Rodovia BR-104, Km 59, s/n – Nova Caruaru, Caruaru – PE, 55002-970  
rodrigoengep@gmail.com

**Thalles Vitelli Garcez**

Universidade Federal de Pernambuco - CAA  
Rodovia BR-104, Km 59, s/n – Nova Caruaru, Caruaru – PE, 55002-970  
tvgarcez@gmail.com

### **RESUMO**

Em contextos na qual a falha de um sistema pode ter efeitos negativos sobre a segurança, instalações e sociedade, a decisão sobre a manutenção deve compreender aspectos que se estendem além da abordagem custo-benefício, utilizada nos modelos clássicos de otimização. Desse modo, as incertezas precisam ser agregadas no planejamento da manutenção. O objetivo desse trabalho é propor um modelo de decisão na manutenção utilizando a Teoria da Utilidade Multiatributo (MAUT) para avaliar os critérios de custo e risco, trabalhando em conjunto sob as perspectivas de manutenção e do gerenciamento de risco, através do princípio ALARP, para determinar o tempo de manutenção em um modelo de substituição em grupo. Para ilustrar, o modelo proposto foi demonstrado em um sistema de transporte ferroviário, na manutenção de um vagão de carga. Os resultados indicam que a consideração da ALARP com utilitário tem um impacto sobre a decisão de manutenção para ambos os critérios.

**PALAVRAS CHAVE. Risco, ALARP, MAUT, Substituição em grupo.**

**Tópicos:** ADM – Apoio à Decisão Multicritério.

### **ABSTRACT**

In contexts in which the failure of a system may have negative effects on safety, facilities and society, the decision on maintenance shall include aspects that extend beyond the cost-benefit approach, used in the classical models of optimization. Thus, uncertainties need to be aggregated in the maintenance planning. The objective of this work is to propose a model of maintenance decision using the Multiattribute Utility Theory (MAUT) to evaluate the criteria of cost and risk, working together under the prospects of maintenance and risk management through the ALARP principle, to determine the time of maintenance on a group replacement model. To illustrate, the proposed model was demonstrated in a freight wagon. The results indicate that the consideration of ALARP with utility has an impact on the maintenance decision for both criteria.

**KEYWORDS. Risk, ALARP, MAUT, Group Replacement.**

**Paper topics.** ADM - Multicriteria Decision Support.



## 1. Introdução

As estratégias de manutenção têm sofrido grandes mudanças nos últimos anos devido a crescente preocupação com as consequências que as falhas podem gerar para os ativos e para a sociedade. Os riscos estão associados as incertezas sobre o tempo em que o componente pode falhar e na complexidade envolvida na decisão por considerar vários critérios. No entanto, vários modelos propostos na literatura têm utilizado a modelagem de otimização clássica para propor estratégias de manutenção tomando por base os custos, não refletindo o efeito do risco e sua potencial consequência. Flage [2013] utilizou a otimização da modelagem relacionada ao gerenciamento de risco de segurança considerando o tempo como parâmetro de decisão, obtendo um resultado limitado a uma região sub-ótima devido aos conflitos existentes entre as dimensões custo e risco. Portanto, a seleção de uma estratégia eficaz necessita agregar as incertezas no modelo de decisão tornando inviável a utilização da modelagem de otimização clássica para representar de forma satisfatória o problema. Logo, a múltipla dimensão do problema justifica o uso de abordagens de decisão multicritério (*Multiple Criteria Decision Making* – MCDM) para compreensão do problema de manutenção considerando os diferentes objetivos expostos.

Em problemas que envolvem riscos, a abordagem do princípio ALARP (*As Low as Reasonable Possible*) é utilizada como uma “ferramenta” que permite limitar os riscos conforme objetivo de segurança ou regulamentação. Esse princípio expressa que o risco deve ser reduzido para um nível tão baixo quanto razoavelmente praticável Aven e Abrahamsen [2007], reduzindo o *trade-off* entre segurança e custos de modo a aumentar a segurança [Bedford e Cooke 2001]. No entanto, Ale et al. [2015] afirmam que a implementação do ALARP pode levar a decisões diferentes em contextos semelhantes, resultando em imprevisibilidade na tomada de decisões e incertezas. Associado a manutenção, o ALARP tem sido aplicado em diferentes contextos [Thodi et al. 2013; Flage 2013; Huynh et al. 2017; Ratnayake 2015] para apoiar as decisões em manutenção mantendo o sistema nas condições desejáveis.

O desafio enfrentado pelos gestores de manutenção é considerar os critérios custo e risco em conjunto para definir as estratégias de manutenção. Portanto, nessa perspectiva a teoria da utilidade vem sendo utilizada para decisões de manutenção onde o espaço de consequências não pode ser reduzido a apenas uma dimensão [de Almeida et al. 2015]. Alguns trabalhos desenvolvidos nesse contexto têm aplicado a Teoria da Utilidade Multiatributo (MAUT) em problemas de decisão em manutenção, Lopes [2016] abordou o problema de decisão de manutenção oportuna considerando custo e tempo de vida residual; Alencar e de Almeida [2015] utilizou para avaliar as consequências da falha para várias dimensões; de Almeida [2012] para a seleção de intervalos de manutenção preventiva; Garcez e de Almeida [2014], focaram em mensurar os riscos multidimensionais incorporando as incertezas em um sistema de distribuição de eletricidade; o estudo proposto por de Almeida, Ferreira, e Cavalcante, [2015], realiza uma revisão sobre aspectos relevantes na aplicação de modelos de decisão Multicritério em manutenção e confiabilidade e oferece algumas orientações sobre como escolher o método adequado.

O objetivo do artigo é propor um modelo de decisão baseado no MAUT para definir o intervalo de substituição em grupo considerando as regiões do ALARP. O modelo foi ilustrado no sistema ferroviário que possui seus ativos expostos a riscos que requerem importante atenção para evitar falhas potenciais em seus componentes. Portanto, o objetivo de decisão é determinar o intervalo de tempo para a substituição em grupo assegurando o sistema sob o nível de risco reduzido ao ALARP.

Este artigo está dividido em 5 seções na qual, além da introdução, a Seção 2 fornece uma breve revisão dos conceitos do ALARP, decisões em manutenção e MCDM. A Seção 3 apresenta o desenvolvimento do modelo. A seção 4 apresenta uma aplicação numérica para o modelo desenvolvido e uma discussão sobre os resultados e análise obtidos, por fim a seção 5 apresenta as considerações finais.

## 2. Referencial teórico



## 2.1. ALARP e Decisões em Manutenção

O princípio ALARP vem sendo aplicado na literatura associado a contextos de decisão em manutenção no sentido de limitar o risco a um nível tão baixo quanto razoavelmente praticável, mantendo-o sob níveis regulamentados ou sob níveis desejados pelo decisor. As atividades e ações de manutenção proporcionam o efeito mitigador ou de prevenção dos eventos indesejados (falhas) auxiliando no controle dos riscos devido as melhorias realizadas na condição do equipamento, consequentemente, resultando na diminuição dos riscos expostos.

O nível de risco que se encontra numa região de transição entre os limites de risco aceitável e inaceitável são considerados a região ALARP [Muttram 2002]. Essa abordagem vem sendo aplicada para apoiar decisões em manutenção para cenários, na qual a falha dos equipamentos durante a operação pode resultar em graves consequências, como na proposta de manutenção de navios desenvolvida por Turan et al. [2011], que desenvolve uma estratégia integrada de manutenção considerando a confiabilidade e criticidade. Thodi et al. [2013] desenvolveram um modelo de integridade baseado no risco para a substituição ótima dos componentes. Já Ratnayake [2015] abordou o princípio ALARP para limitar os riscos com uma política de inspeção aplicado em tubulações submarinas; Khan e Haddara [2003] utilizaram o ALARP para desenvolver uma programação de manutenção baseada no risco; Flage [2013] implementou do princípio ALARP com a política de substituição por idade no contexto da otimização de manutenção.

Na interpretação da região ALARP algumas discussões têm sido levantadas na literatura sobre o fator de ajuste para a “desproporção grosseira”, na qual representa uma desproporção entre investimentos necessários e benefícios obtidos com as medidas de redução de risco [Flage 2013; French et al. 2005; Jones-Lee e Aven 2011; Kletz 2005]. Desse modo, as ações de manutenção se fazem desnecessárias para os casos em que os riscos são insignificantes, devido ao custo associado.

Na análise tradicional, baseada somente em custos, essa avaliação não pode ser realizada devido as comparações simples, pois não envolvem as incertezas, essenciais nesse contexto decisório em que as ações de manutenção devem ser aplicadas afim de reduzir as probabilidades de ocorrência do risco ou exercer um controle sob as possíveis consequências [Chen 2012]. Logo, ao tomar uma decisão em manutenção as consequências devem ser consideradas, para isso o modelo deve incorporar as preferências do decisor sobre essas consequências, introduzindo a necessidade de trabalhar o modelo como um problema de decisão multicritério (MCDM).

## 2.2. ALARP e MCDM

O princípio ALARP pode ser entendido no contexto dos métodos MCDM como uma avaliação intra-critério [de Almeida et al. 2015]. A abordagem MCDM também permite uma análise trade-off dos investimentos para reduzir os riscos quando o nível tolerável é atingido incluindo os múltiplos objetivos estratégicos da organização [de Almeida et al. 2015]. A aplicação do ALARP é utilizada, em grande parte dos estudos associados a MCDM, para orientar a análise de riscos através da definição de metas a serem alcançadas. Sob o enfoque econômico, ao utilizar apenas o critério de aceitação de risco proposto pelo ALARP pode tornar ineficiente a alocação de recursos escassos devido a utilidade do investimento na medida de segurança ser maior para a sociedade do que para a empresa [Abrahamsen 2011]. Assim, o uso de critérios de aceitação de risco, podem reduzir a utilidade, na visão da empresa, pelo fato dos critérios de aceitação de risco não serem apropriados para maximizar a utilidade esperada.

A abordagem MCDM incorpora as incertezas e concilia os objetivos em risco e custo transformando as alternativas de decisão para uma única medida de análise para apoiar o processo decisório. Essa abordagem foi utilizada por Marsaro et al. [2014] para compor um modelo de decisão multicritério aplicado a gasodutos para avaliação do risco considerando as dimensões: humana, ambiental e financeira denotando níveis de risco conforme a utilidade das consequências. Cardoso-Junior et al. [2011] abordaram os princípios do ALARP para limitar as regiões de aceitação de risco em conjunto com as técnicas de estruturação de problema VFT e mapa cognitivo



durante a fase de análise de riscos em um projeto de Veículo lançador de satélites. Rasheed et al. [2015] utilizaram o método AHP em um problema de decisão sobre estratégias de gerenciamento de riscos.

A teoria de utilidade de multiatributo (MAUT) permite a quantificação e agregação de múltiplos objetivos mesmo quando esses objetivos são compostos de atributos conflitantes ou quando são subjetivos [de Almeida and Bohoris 1995]. Essa teoria aborda explicitamente os *tradeoffs* de valor e as incertezas que invariavelmente são o foco do MCDM [Keeney e Raiffa 1993].

No processo decisório, as consequências podem envolver aspectos muitas vezes desconhecidos sob o ponto de vista prático a exemplo os riscos envolvidos. Portanto, isso requer uma avaliação integrada do problema, que de acordo com Munda [2008], é vista como um diferencial ao utilizar os métodos de decisão multicritério por olhar sob vários pontos de vista o mesmo problema.

A aplicação da teoria da utilidade possibilita identificar a desejabilidade das ações pelo decisor conforme a sua estrutura de preferências, permitindo uma decisão racional conforme a utilidade esperada de cada possível consequência das alternativas tomadas, obtendo a ação a ser recomendada representada pela alternativa com a maior utilidade esperada. Quanto ao perfil dos decisores, a teoria de utilidade considera três níveis de atitudes ao risco: neutralidade, aversão e propensão ao risco [Fishburn 1970].

Dessa forma, os critérios envolvidos no problema precisam ser representados por preferências obtidas por uma função utilidade, permitindo a conversão do problema em uma forma algébrica que utiliza as preferências do decisor por meio dos conceitos da Teoria da Utilidade [Alencar et al. 2011]. Quanto a aplicação do MAUT, de Almeida et al. [2015] justifica que o método é capaz de solucionar problemas de decisões envolvendo critérios múltiplos por apresentar um protocolo bem estruturado, apoiado por um quadro axiomático consistente.

### 3. Desenvolvimento do Modelo

O modelo tendo como base o princípio ALARP, foi desenvolvido considerando o trabalho desenvolvido por Flage [2013], que utilizou somente o critério custo para a definição da ação de manutenção de substituição por idade. Diferentemente, o presente trabalho propõe utilizar dois critérios, o critério custo e o critério risco sob uma abordagem multidimensional, implementando o princípio ALARP para a definição da ação de manutenção de substituição em grupo, dado que a substituição em grupo caracteriza vários tipos de sistemas que podem envolver risco. Portanto, o modelo busca tratar de um problema complexo para o decisor identificando o intervalo de tempo  $T$  obtendo a melhor relação entre o conflito dos objetivos custo e risco. As nomenclaturas necessárias para o entendimento do modelo são apresentadas no Quadro 1.

Quadro 1: Nomenclaturas

Parâmetro	Descrição
$T$	Idade para substituição preventiva. (Parâmetro de decisão)
$B(T)$	Custo esperado de substituição em grupo por unidade de tempo.
$F(T)$	Função densidade de probabilidade dos tempos de falha dos itens.
$C(T)$	Custo esperado do ciclo de substituição.
$D(T)$	Duração esperada do ciclo.
$L(Y)$	Função desproporção
$d(y)$	Fator desproporção.
$f(x)$	Função taxa de falha.
$H(x)$	Número de falha esperado.
$r(T)$	Índice de risco expresso em função do parâmetro de decisão $T$ .
$X$	Variável aleatória de tempo.
$c_p$	Custo de uma substituição preventiva.
$c_s$	Custo de segurança (Falha levar a um acidente).




---

$c_g$	Custo de uma substituição conjunta.
$c_f$	Custo da falha.
$c_c$	Custo de uma substituição corretiva
$N$	Número total de itens do grupo
$k$	Custo de uma substituição corretiva.
$k'$	Custo fixo incorrido por uma falha no sistema, independente da falha levar ou não a um acidente.
$v$	Valor de prevenir uma fatalidade.
$p_A$	Probabilidade de ocorrer um acidente A.
$PLL_A$	Número esperado de fatalidades.
$F(T)$	Função distribuição da taxa de falha.
$P(X \leq T)$	Probabilidade de ocorrência de falha dentro do período T.
$Emin\{X, T\}$	Duração esperada do ciclo.
$c_s$	Custo de segurança (Falha levar a um acidente).
$c_g$	Custo de uma substituição conjunta.
$IR_i$	Risco individual da $i$ -ésima pessoa
$r_a$	Limite superior de aceitação de risco
$r_{ac}$	Limite superior de risco amplamente aceitável
$a$	Constante ( $a > 0$ ) Definida pelo decisor para cada função de utilidade unidimensional, para ajustar a visualização da informação que ilustra sua atitude em relação ao risco.
$(r)$	Dimensão de consequência risco
$(c)$	Dimensão de consequência custo
$k_1$ e $k_2$	Constantes de escala que indicam o valor de <i>trade-off</i> (dimensão consequência)
$U(x)$	Função utilidade
$U(r)$	Função utilidade para a dimensão risco
$U(c)$	Função utilidade para a dimensão custo
$y$	Representa os valores da consequência considerada dado a dimensão das consequências.
$\theta$	Estado da natureza expressando a incerteza associada ao problema, representando o cenário de falha do componente dado.
$\theta'$	Cenário de não ocorrência da falha.

---

### Pressupostos

Os seguintes pressupostos foram adotados:

- O sistema investigado compreende  $N$  componentes idênticos;
- Os tempos de falha do equipamento podem ser modelados por uma função de densidade de probabilidade conhecida  $f(t)$  com taxa de falha crescente;
- O componente admite apenas dois estados, falho ou operacional;
- A falha do sistema é identificada imediatamente;
- O custo da substituição preventiva é inferior ao da substituição corretiva;
- O tempo para realizar uma substituição é considerado desprezível;
- A substituição do item restaura o sistema para o estado de tão bom quanto novo.

A análise do parâmetro custo é realizada sob a relação custo por unidade de tempo  $B(T)$ , onde  $T$  representa o parâmetro de decisão. A Equação (1) permite obter os custos referentes para cada intervalo de tempo  $T$  devido a execução das ações de manutenção com ação de renovação do sistema. A razão entre o custo do ciclo esperado de substituição  $C(T)$  e a duração do ciclo esperado  $D(T)$  denota o custo esperado por unidade de tempo [Aven e Dekker 1997].

$$B(T) = \frac{C(T)}{D(T)} \quad (1)$$

O  $C(T)$ , definida na Equação (2), pode ser decomposto pelos custos das ações de manutenção necessárias durante o ciclo, que são o custo da substituição preventiva  $c_p$  e o custo da substituição corretiva  $c_c$ . O primeiro considera o custo da aquisição do componente em grupo, dado pela Equação (3) [Blischke e Murthy 2003].



$$C(T) = c_p + c_c \quad (2)$$

$$c_p = Nc_g \quad (3)$$

Dada a ocorrência da falha, o custo com a substituição corretiva é estimado por dois custos, como demonstrado por [Flage 2013]. O custo fixo  $k'$  referente a falha do sistema e o custo esperado em segurança  $c_s$  caso a falha resulte um acidente, representado pela Equação (4) [Vatn and Aven 2010]

$$c_s = p_A PLL_A v \quad (4)$$

onde a probabilidade de que uma falha resulte em um acidente (A) com fatalidade é representada por  $p_A$  e o custo relaciona o potencial de perda de vida ( $PLL_A$ ) com o valor de prevenir uma fatalidade ( $v$ ). Logo, o custo da falha totalizando as perdas de segurança e econômica é representado pela Equação 5:

$$c_f = k' + c_s \quad (5)$$

Dado um período de tempo  $t_p$ , tem-se que  $H(T)$  representa o número esperado de vezes que o item falhe no período  $[0, T]$  e  $N$  representa o número total de itens no grupo. Logo, o custo total de manutenção corretiva para o período é dado pela Equação (6).

$$c_c = NH(T)C_f \quad (6)$$

Utilizando as Equações (1) – (6), é possível obter o custo total esperado de substituição em grupo por unidade de tempo indicado como  $G(T)$ , dado na Equação (7), no momento  $T$  que representa a idade do componente dada pelo valor atual da medida de uso do componente [Jardine e Tsang 2013].

$$G(T) = \frac{c_p + NH(T)c_c(T)}{\int_0^T (1-f(x))dx} \quad (7)$$

Associada a abordagem de segurança, a confiabilidade torna-se útil para delinear os limites da região ALARP em termos de parâmetros de decisão de modelos de otimização de manutenção [Flage 2013]. Logo,  $r(T)$ , dado pela Equação (8), expressa o nível de risco em função do parâmetro de decisão  $T$  considerando possível evento representado pela falha do equipamento associado a consequência ( $PLL_A$ ) e a probabilidade de ocorrer o acidente ( $p_A$ ).

$$r(T) = (\text{Evento}, \text{Consequência}, \text{Probabilidade})$$

$$r(T) = N \left( \int_0^T f(T)dt \right) PLL_A p_A \quad (8)$$

Um fator de ajuste dado pela Equação (9), necessita ser implementado para retificar a desproporção existente entre a variação de custo e o respectivo risco associado, representando de forma adequada a variação do risco conforme variação do custo [Flage 2013].

$$d(y) = \begin{cases} 1 & \text{se } y \leq r_a \\ L(y), r_{ac} \leq y < r_a \\ \infty, & y \geq r_a \end{cases} \quad (9)$$

$$L(y) = 1 + \left( \frac{r(T)}{25} \right) \quad (10)$$



Em atendimento ao problema em análise, o custo de segurança é dado em função do nível de risco em função do parâmetro de decisão  $T$ , Logo,

$$C_{seg}(T) = NPLL_A p_A d(r(T))r(T)v \quad (11)$$

A recomendação da solução é obtida pela Equação (11), de modo a identificar a ação  $p$  que maximize a utilidade global. Sob a condição de utilidade independente Keeney e Raiffa [1993], a função de utilidade depende apenas do nível particular do resultado no critério  $y$ , mesmo assim, por uma transformação linear.

A abordagem de resolução consiste em subdividir a avaliação da função utilidade em partes que em seguida são agregadas [Keeney 1992]. Os objetivos abordados são custo e risco, onde o primeiro considera os custos associados as ações de manutenção e ao valor de prevenir uma fatalidade, e o segundo representa o potencial de risco de fatalidade ocasionado por uma falha. Obtendo-se as funções de utilidade unidimensional para cada um desses critérios, ou seja, a função utilidade em custo  $U(C)$  e a função utilidade em risco  $U(R)$ , é possível definir a função única de síntese em utilidade  $U(C, R)$  demonstrado pela Equação (12).

$$U(C, R) = f[U(C), U(R)] \quad (12)$$

Neste trabalho foi considerado que existe independência em utilidade entre os critérios  $R$  e  $C$ , conforma mostrado pela Equação (13).

$$U(C, R) = k_C U(C) + k_R U(R) \quad (13)$$

onde  $k_C$  e  $k_R$  são as constantes de escala dos critérios da função utilidade custo e risco, respectivamente. A elicitacão das funções de utilidade é definida em uma escala de intervalo de consequências  $[0, 1]$  para as quais os valores próximos a "0" estão associadas as consequências com um valor mínimo em utilidade, enquanto que um valor máximo próximo a "1" representa um valor máximo em utilidade. O problema é resolvido escolhendo a ação  $p_i$ , tal que  $U(C, R)$  seja maximizada, conforme mostrado na Equação (14).

$$\max_{p_i} U(C, R) \quad (14)$$

A utilidade é calculada pela combinação de probabilidade de consequências determinísticas  $q$  em  $a_i$ , onde a utilidade é definida de acordo com a Equação (15) para casos discretos,

$$U(\theta, a_i) = \sum_q P(q|\theta, a_i)U(q), \quad (15)$$

sendo  $\theta$  o estado da natureza. Assim, o perfil do decisor em relação as utilidades unidimensionais neste modelo são representadas por: neutralidade ao custo dado pela Equação (16); aversão ao risco dado pela Equação (17).

$$U_c(T) = a_1 - b_1 G(T) \quad (16)$$

$$U_R(T) = a_2 - b_2 e^{-\beta C_{seg}(T)} \quad (17)$$

Para facilitar o entendimento do estudo, a metodologia proposta neste trabalho segue os seguintes passos:

1. Tratar os dados dos relatórios de falha e elaborar a função distribuição de probabilidade. Estimar os parâmetros de confiabilidade;



2. Estimativa dos parâmetros do custo de substituição em grupo  $C_g$ , custo fixo da falha  $k'$  e valor de prevenir uma fatalidade  $v$ . Estes parâmetros são aplicados às Equações (3), (4) e (5). Assim, o custo para cada ação é calculado por procedimentos numéricos como é usual para esse tipo de função;
3. Utilizar as Equações (2), (3), (4), (5) e (6) na Equação (1), obtendo a Equação (7);
4. Mensurar os níveis de risco amplamente aceitáveis e inaceitáveis para delimitar a região ALARP;
5. Definir o fator de desproporcionalidade para ajustar o nível de risco para diferentes alternativas;
6. Desenvolver a função custo de segurança (11) que contemple os parâmetros de risco aplicado ao contexto;
7. Aplicar um procedimento de elicitação com o decisor para identificar o perfil quanto ao risco, bem como a função mais adequada para  $U_c(T)$  e  $U_r(T)$ , que represente as dimensões custo e risco respectivamente. Assim, os parâmetros  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $b_1$ ,  $b_2$  e  $\beta$  nas Equações (16) e (17) também devem ser obtidos;
8. Obter os parâmetros  $K_c$  e  $K_r$  para a função  $U(C, R)$  na Equação (13);
9. Obter as utilidades unidimensionais para custo e risco. Em seguida, a utilidade multiatributo  $U(C, R)$  é obtida para cada ação  $p_i$  calculada aplicando a Equação (13);
10. A alternativa a ser recomendada é obtida pela ação para a qual a  $U(C, R)$  seja maximizada.

#### 4. Aplicação

O modelo proposto foi ilustrado em um contexto realístico representado por um vagão ferroviário utilizado para transporte de carga. O problema de decisão é determinar o plano de manutenção para os mancais do vagão, que totalizam oito mancais (*bearing box*). A falha deste componente durante a operação pode ocasionar um acidente (A) com a probabilidade  $p_A = 0,15$  definida para o período em que o componente está em execução durante o deslocamento desde a localização inicial até à localização final numa linha de tráfego individual. Esta definição é análoga a definição de confiabilidade, representada pela probabilidade de executar uma função requerida sem falhar em determinadas condições de operação durante um período de tempo especificado. O decisor é especialista em transporte de carga e os dados foram coletados com base no relatório de confiabilidade disponibilizado pelo fabricante do componente. Dado a ocorrência do acidente, foi estimado um potencial de perda de vida representado por  $PLL_A = 0,0001$ .

Para a implementação do modelo foi considerado uma política de substituição em grupo com o custo do componente na substituição em grupo equivalente a  $c_g = 38$ , os componentes da função Weibull são parâmetro de escala  $\alpha = 989,9$ , e parâmetro de forma  $\beta = 1,435$ , a unidade de tempo  $T$  considerada parâmetro de decisão é dada em milhas.

Além disso, o custo fixo  $c_p = 0,05$ , a substituição corretiva é composta por uma parte variável referindo-se ao custo de segurança associado ao risco e outra fixa estimada com valor  $k' = 50$ , o valor de prevenir uma fatalidade  $v = 150$ . Para a região ALARP tem-se que  $r_{ac} = 1 \times 10^{-5}$  e  $r_0 = 1 \times 10^{-3}$ , onde  $r_{ac}$  e  $r_0$  representam o limite de aceitação de risco amplamente aceitável e o limite inaceitável, respectivamente.

#### 4.2. Resultados e Discussões

Nesta seção, a aplicação numérica é apresentada para ilustrar o modelo de decisão multicritério desenvolvido para avaliação da política de manutenção de substituição em grupo para diferentes intervalos de tempo. Os resultados foram obtidos com base nas etapas apresentadas na seção anterior. Os níveis de custo e risco foram analisados em função de seus respectivos desempenhos em utilidade conforme o perfil de preferência do decisor. No caso em estudo, a Figura





1 representa o resultado obtido pela Equação (17) apresentando uma redução da utilidade com o tempo de manutenção  $T$ , sob a perspectiva da programação da manutenção, desse modo o exemplo expõe a aversão do decisor em relação ao risco.

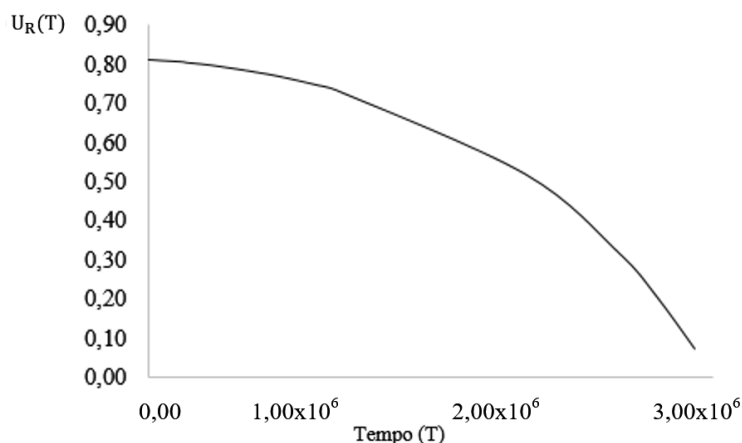


Figura 1: Função Utilidade em Risco x Idade para substituição preventiva  $T$ .  
Esta Pesquisa (2017).

Quanto a utilidade em custo obtida pela Equação (16) foi identificado que a utilidade para o decisor aumenta em função do tempo devido a programação da manutenção em intervalos maiores propiciarem um menor custo de manutenção. A função utilidade em relação ao custo é representada pela Figura 2.

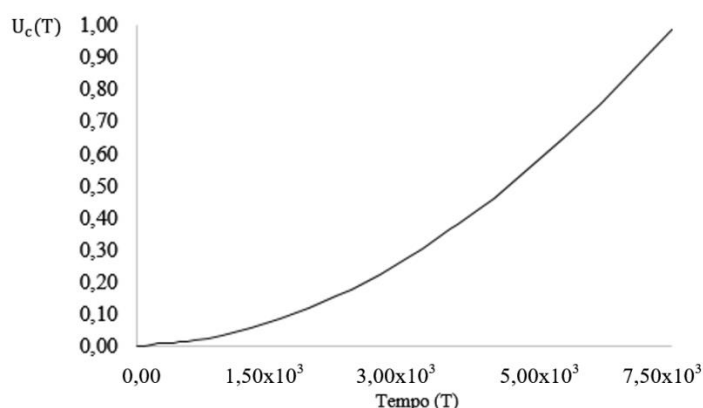


Figura 2: Função Utilidade em Custo x Idade para substituição preventiva  $T$ .  
Esta Pesquisa (2017).

Conforme apresentado pelas Figuras 1 e 2, as utilidades unidimensionais obtidas  $U_c(T)$  e  $U_R(T)$  ilustram o conflito entre os objetivos dos critérios em função de  $T$ , revelando que a variação do intervalo de manutenção implica em diferentes resultados no custo de manutenção e em risco, uma vez que ao aumentar o intervalo obtém-se uma melhoria na utilidade em custo, mas a utilidade em risco decresce devido ao grande período de exposição ao risco. No caso da redução do intervalo, a utilidade em custo é reduzida devido a remoção prematura dos componentes e melhoria da utilidade em risco, esse efeito pode ser explicado pelo incremento em custo de segurança.

Para facilitar a visualização dos resultados, a Figura 3 representa as recomendações dos valores de idade para substituição preventiva  $T$  que atendem a região ALARP.

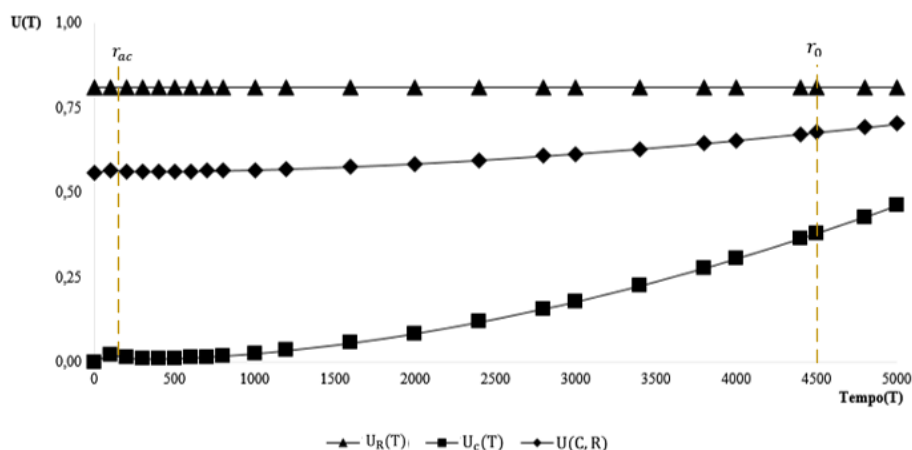


Figura 3: Função utilidade  $U_C(T)$ ,  $U_R(T)$  e  $U(C, R)$ .  
Esta pesquisa (2017).

Os limites de aceitação impostos pelo ALARP, representados pelos limites de  $r_{ac}$  e  $r_0$ , apresentam as restrições de risco incorporadas ao modelo. Essas restrições reduzem o conjunto de alternativas a serem selecionadas para uma faixa de valores entre 180 e 4500 milhas para ações de manutenção. Dessa forma, alternativas que potencialmente poderiam representar um melhor desempenho em utilidade não poderiam ser recomendadas por não atenderem ao intervalo do ALARP.

O intervalo recomendado permite ao decisor uma faixa de opções em que considera a utilidade e as restrições impostas pelo ALARP para definir a política de manutenção. Considerando os possíveis intervalos dentro da região ALARP, o modelo obteve como recomendação o intervalo de 4500 milhas para a realização da ação de manutenção preventiva com  $U(C, R) = 0,677$ , atendendo de forma satisfatória a estrutura de preferência do decisor sob um risco controlado. No entanto, caso não houvesse limitação quanto ao conjunto de alternativas, definido pela região ALARP, a recomendação seria de um intervalo de 7500 milhas com  $U(C, R) = 0,865$ , mas para o estudo aplicado o risco deve ser controlado devido a severidade das consequências.

A função desproporção não resultou em variações significativas na região ALARP devido a pequena variação do risco na região controlada. Uma análise de sensibilidade foi realizada para verificar a adequação do modelo com às preferências do decisor, obtendo-se que a representação é satisfatória.

## 5. Considerações Finais

Com base nos resultados apresentados, a incorporação do princípio ALARP permite a definição do intervalo de manutenção considerando a relação custo-benefício e assegurando o nível de risco. O modelo de decisão desenvolvido sob a abordagem multicritério se apresentou eficaz ao considerar as restrições dadas pelo ALARP relacionadas ao perfil do decisor para determinar a alternativa com melhor desempenho em utilidade. Dessa forma, o modelo considerou o impacto real que as consequências podem acarretar em múltiplas dimensões, atendendo a processos decisórios de maior complexidade.

Este modelo permite ao decisor definir quanto investir, para garantir que seus ativos continuem a desempenhar suas funções sob as condições desejadas, como também minimizar ou mesmo eliminar os impactos das consequências realizando decisões dentro de um conjunto de alternativas que lhe permita atuar dentro de limites regulamentados de exposição ao risco.

A aplicação da utilidade permitiu avaliar os efeitos das possíveis variações de intervalos de manutenção, ofertando ao decisor a compreensão sobre o efeito em diferentes intervalos de  $T$ . Além de gerar resultados mais consistentes ao avaliar problemas em que a análise custo-benefício tradicional não reflete de forma satisfatória o contexto decisório onde a dimensão risco está envolvida, auxiliando gerentes em seu planejamento de manutenção.



## Agradecimentos

Este trabalho foi parcialmente apoiado pela Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco (FACEPE).

## Referências

Abrahamsen, E. B. (2011). On the rationality of using risk acceptance criteria based on the expected utility theory. *2* (1): 70–78.

Ale, B.J.M., Hartford, D.N.D. e Slater, D. (2015). ALARP e CBA all in the same game. *Saf. Sci.* 76: 90–100. 9

Alencar, L. H., de Mota, C. M. M. e Alencar, M. Hazin. (2011). The problem of disposing of plaster waste from building sites: Problem structuring based on value focus thinking methodology. *Waste Manag.* 31 (12): 2512–2521.

Alencar, M. H. e de Almeida, A. T. (2015). A Multicriteria Decision Model for Assessment of Failure Consequences in the RCM Approach. *Math. Probl. Eng.*

Aven, T. e Dekker, R. (1997). A useful framework for optimal replacement models. *Reliab. Eng. Syst. Saf.* 58 (1): 61–67.

Aven, T. e Abrahamsen, E. (2007). On the use of cost-benefit analysis in ALARP processes. *Int. J. Performability Eng.* 3, (3): 345–353.

Bedford, T. e Cooke, R. (2001). Probabilistic Risk Analysis, Foundations e Methods. *Probabilistic Risk Anal. Found. Methods*: 414.

Blischke, W. R. e Murthy, D. N. P. (2003). *Case Studies in Reliability e Maintenance*, Wiley.

Cardoso-Junior, M. M., Fidelis, L. O., Gonçalves, T. J. M. e Belderrain, M. C. N. (2011). Estruturação do problema: Gerenciamento de riscos do veículo lançador de satélite. *Ingepro* 3 (1): 43–55.

Chen, Y. (2012). *Improving Railway Safety Risk Assessment Study*.

de Almeida, A. T. (1995). *Decision theory in.* 1(1): 39–45.

de Almeida, A. T. (2012). Multicriteria model for selection of preventive maintenance intervals. *Qual. Reliab. Eng. Int.* 28, (6): 585–593.

de Almeida, A. T., Cavalcante, C. A. V., Alencar, M. H., Ferreira, R. J. P., de Almeida-Filho, A. T. e Garcez, T. V. (2015). *Multicriteria e Multiobjective Models for Risk, Reliability e Maintenance Decision Analysis*, Cham: Springer International Publishing.

de Almeida, A. T., Ferreira, R. J. P., & Cavalcante, C. A. V. (2015). A review of the use of multicriteria and multi-objective models in maintenance and reliability. *IMA Journal of Management Mathematics*, 26(3), 249–271.

Fishburn, P. C. (1970). *Utility Theory for Decision Making*. *Res. Anal. Corp.*: 1–246.

Flage, R. (2013). On risk reduction principles in the context of maintenance optimisation modelling. *Proc. Inst. Mech. Eng. Part O J. Risk Reliab.* 227 (3): 241–250.

French, S., Bedford, T. e Atherton, E. (2005). Supporting ALARP decision making by cost benefit analysis e multiattribute utility theory. *J. Risk Res.* 8, (3): 207–223.



- Garcez, T. V. e de Almeida, A. T. (2014). A risk measurement tool for an underground electricity distribution system considering the consequences e uncertainties of manhole events. *Reliab. Eng. Syst. Saf.* 124: 68–80.
- Huynh, K. T., Grall, A. e Bérenguer, C. (2017). Assessment of diagnostic e prognostic condition indices for efficient e robust maintenance decision-making of systems subject to stress corrosion cracking. *Reliab. Eng. Syst. Saf.* 159: 237–254.
- Jardine, A. K. S. e Tsang, A. H. C. (2013). *Maintenance, Replacement, e Reliability: Theory e Applications, Second Edition*, Taylor & Francis.
- Jones-Lee, M. e Aven, T. (2011). ALARP - What does it really mean? *Reliab. Eng. Syst. Saf.* 96, (8): 877–882.
- Keeney, R. L. (1992). *Value-focused thinking: A Path to Creative Decision making*.
- Keeney, R. L. e Raiffa, H. (1993). *Decisions with Multiple Objectives: Preferences e Value Trade-Offs*, Cambridge University Press.
- Khan, F. e Haddara, M. (2003). Risk-based maintenance (RBM): A quantitative approach for maintenance/inspection scheduling e planning. *J. Loss Prev. Process Ind.* 16, (6): 561–573.
- Kletz, T. A. (2005). Looking Beyond ALARP. *Process Saf. Environ. Prot.* 83, (2): 81–84.
- Lopes, R. S., Cavalcante, C. A. V. e Nascimento, T. G. (2016) Multi-attribute Utility Theory analysis for burn-in processes combined with replacement Analiza połączonych procesów sztucznego starzenia i wymiany prowadzona w oparciu. 18 (4): 599–605.
- Marsaro, M. F., Alencar, M. H., de Almeida, A. T. e Cavalcante, C. A.V. (2014). Multidimensional risk evaluation: Assigning priorities for actions on a natural gas pipeline. *PSAM 2014 - Probabilistic Saf. Assess. Manag., Dm*.
- Munda G. (2008). *Social Multi-Criteria Evaluation for a Sustainable Economy*, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Muttram, R.I. (2002). Railway safety's safety risk model. *Proc. Inst. Mech. Eng. Part F J. Rail Rapid Transit* 216, (2): 71–79.
- Rasheed, S., Wang, C. F. e Lucena, B. (2015). Risk leveling in program environments - A structured approach for program risk management. *Sustain.* 7, (5): 5896–5919.
- Ratnayake, R. M. C. (2015). Risk Based Integrity Assessment e Control of Ageing Subsea Pipelines: an Expert System Based Approach.: 1–10.
- Thodi, P., Khan, F. e Haddara, M. (2013). Risk based integrity modeling of offshore process components suffering stochastic degradation. *J. Qual. Maint. Eng.* 19, (2): 157–180.
- Turan, O., Lazakis, I., Judah, S. e Incecik, A. (2011). Investigating the reliability e criticality of the maintenance characteristics of a diving support vessel. *Qual. Reliab. Eng. Int.* 27, 7: 931–946.
- Vatn, J. e Aven, T. (2010). An approach to maintenance optimization where safety issues are important. *Reliab. Eng. Syst. Saf.* 95 (1): 58–63.