

# PROPOSTA DE METODOLOGIA PARA A OTIMIZAÇÃO DOS CUSTOS E RISCOS ASSOCIADOS A RECUPERAÇÃO DE VAGÕES DE ENXOFRE\*

Breno Carvalho de Oliveira<sup>1</sup>  
Clayton Guimarães de Almeida<sup>2</sup>  
Breno Delgado Silva<sup>3</sup>  
Eduardo Gontijo Carrano<sup>4</sup>

## Resumo

Neste trabalho apresenta-se o desenvolvimento de uma metodologia para a análise multiobjetivo aplicada ao planejamento estratégico da intervenção de vagões de enxofre. A instância de teste é composta por 400 vagões HPE de propriedade da empresa VLI Logística SA, que foram deteriorados pelo alto nível de corrosão do produto transportado. Deste modo, tem como objetivo a minimização dos custos de recuperação e riscos para um horizonte de planejamento de 10 anos. O problema foi modelado através de programação linear inteira e implementou-se um algoritmo para a tratativa do problema utilizando a abordagem  $\epsilon$ -Restrito, para obtenção das soluções pareto ótimo e posterior tomada de decisão. Por fim, através de uma simulação prévia e seleção de uma solução conservadora, obteve-se como resultado a redução de 20% de custos para o ciclo orçamentário de 10 anos. Mostrando a eficiência da metodologia.

**Palavras-chave:** Otimização Multiobjetivo; Minimização de Custos, Vagões de Enxofre; Engenharia de Manutenção.

## METHODOLOGY FOR COSTS AND RISKS OPTIMIZATION ASSOCIATED WITH THE RECOVERY OF SULFUR FREIGHT CARS

### Abstract

In this work the development of a methodology for the multiobjective analysis applied to the strategic planning of the intervention of sulfur wagons is presented. The test unit is composed of 400 HPE wagons owned by the company VLI Logística SA, which have been deteriorated by the high level of corrosion of the transported product. In this way, its objectives are to minimize recovery costs and risks for a 10-year planning horizon. The problem was modeled through integer linear programming and an algorithm was implemented to deal with the problem using the  $\epsilon$ -Restricted approach, in order to obtain the Pareto optimal solutions and later decision making. Finally, through a previous simulation and selection of a conservative solution, the result was a 20% reduction in costs for the 10-year budget cycle. Showing the methodology's efficiency.

**Keywords:** Multiobjective Optimization; Costs Minimization; Sulfur Freight Cars; Maintenance Engineering.

<sup>1</sup> Engenheiro Eletricista, Mestrando em Engenharia Elétrica UFMG, Analista de Processos de Engenharia, Gerência de Engenharia de Material Rodante, VLI, Divinópolis, Minas Gerais, Brasil.

<sup>2</sup> Bacharel em Sistemas de Informação, Mestrando em Engenharia Elétrica UFMG, Analista de Sistemas Pleno, Gerência de Tecnologia da Informação, VLI, Divinópolis, Minas Gerais, Brasil.

<sup>3</sup> Engenheiro de Produção, Supervisor da Engenharia de Vagões, Gerência de Engenharia de Material Rodante, VLI, Divinópolis, Minas Gerais, Brasil.

<sup>4</sup> Doutor em Engenharia Elétrica, Professor do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil.

## 1 INTRODUÇÃO

A manutenção deixou de ser nas últimas décadas uma simples atividade de reparo para se tornar um meio essencial ao alcance dos objetivos e metas da organização. Do mesmo modo que equipamentos parados em momentos inoportunos comprometem a produção e podem significar perdas irre recuperáveis num ambiente altamente competitivo [1].

Esta nova concepção vem conduzindo a manutenção a assumir uma nova postura estratégica, não bastando apenas reparar o equipamento, mas é preciso principalmente definir planejamentos estratégicas visando a redução de gastos operacionais, prezando assim uma tomada de decisão inteligente que visa a redução da probabilidade de uma parada de produção não planejada e custos adicionais a empresa [2].

Seguindo o contexto atual, a combinação de complexos algoritmo matemáticos com processamento inteligente de dados, viabilizou o desenvolvimento de avançadas técnicas de otimização, possibilitando atender uma inúmera gama de aplicações industriais.

Segundo [3], renomados engenheiros de negócios, antes de tomar decisões importantes, realizavam análises levando em consideração cada possibilidade visando identificar cada opção dos diversos cenários. Porém conseguir realizar esta tarefa para um grupo de opções que deve ser analisada em conjunto em um problema complexo, se torna humanamente impossível.

Neste contexto, este trabalho tem como objetivo apresentar uma abordagem para apoiar os processos de tomada de decisão que visam minimizar os riscos e os custos associados a recuperação de vagões de carga para transporte de enxofre, em um horizonte de 10 anos. Oferecendo uma ferramenta computacional de otimização para o suporte à tomada de decisão.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO

Esta seção trata da descrição do problema proposto, assim como a fundamentação teórica necessária para resolução deste.

### 2.1 Descrição do Problema

A empresa VLI Logística S.A. possui ativos ferroviários denominados vagões, que são responsáveis pelo o transporte de carga geral em seus corredores logísticos, que integram portos, terminais e ferrovias.

Deste modo, este trabalho tem como objetivo o atendimento e manutenção dos vagões HPE's que transportam Enxofre/Fosfato e possuem um elevado índice de falhas decorrente à corrosão da Superestrutura.



**Figura 1** – Vagão HPE destacando sua Superestrutura

A Superestrutura conforme visto na figura 1, é a parte superior do vagão, que é responsável pelo acondicionamento da carga transportada. Sua construção é adaptada conforme as características do produto a ser transportado e o tipo de carga/descarga. Deve possuir a maior resistência possível aos esforços mecânicos e proporcionar economia na conservação, o que exige uma construção simples, robusta, durável e que permita fácil manutenção.

Os vagões HPE's séries 255, 706, 054 e 058, possuem uma idade média de 15 anos, contudo devido as características corrosivas do produto transportado acrescidos a ação do tempo ao longo dos anos, estão contribuindo para o desgaste acelerado dos painéis laterais e teto dos vagões. O que tem diminuído a vida útil destes ativos e gerado custos adicionais a operação em decorrência ao vazamento de carga e recusa de vagões nos clientes.

Nas Figuras 2 e 3 pode-se observar a corrosão nos vagões:



**Figura 2** – Corrosão na parte interna



**Figura 3** – Furos no painel lateral

Normalmente as manutenções dos vagões são planejadas, entretanto, mediante as inúmeras variáveis envolvidas durante a utilização do ativo, não foi possível prever de maneira assertiva, a expectativa de vida da estrutura dos vagões ao longo dos anos.

O tratamento para reestabelecer operacionalmente os vagões depreciados, exigem investimentos dispendiosos e o cumprimento de um planejamento de longo prazo. No qual em decorrência ao alto valor agregado das intervenções e mediante a estratégia financeira da companhia, é amortizado em um horizonte de planejamento de 10 anos e limitado a um ciclo orçamentário anual.

Deste modo, foi estimado a recuperação da superestrutura dos 400 vagões mais críticos, objetivando reduzir a probabilidade de uma parada de produção não planejada e custos adicionais a operação.

Para tanto, foi definido 4 escopos de recuperação para a Superestrutura dos vagões HPE da VLI, que visam estabelecer medidas preventivas direcionadas ao tratamento das anomalias de corrosão dos painéis laterais, teto e pintura interna, conforme pode ser observado nas Figuras 4, 5 e 6. Detalhados a seguir:

- I. **Não Executar** → não realizar nenhuma intervenção (condição algoritmo);
- II. **Tapa Buraco** → paliativo de chapa de zinco + PU;
- III. **Substituição da Chaparia** → substituição da chapa de aço carbono;
- IV. **Revestimento Interno** → substituição da chapa + revestimento de poliuréia.

Sendo que quanto maior o nível do plano de recuperação, mais caro é o seu custo de intervenção e maior é sua expectativa de duração em um horizonte de vida útil.



Figuras 4, 5 e 6 – Tapa Buraco / Substituição da Chaparia / Revestimento Interno

Do mesmo modo que quanto maior o nível do plano de recuperação, menor é o risco operacional que o ativo oferecerá. Sendo estes riscos:

- **Retenção** → a indisponibilidade do ativo, gera impacto no volume transportado, ou seja, menor a oferta de vagões (Figura 7).
- **Multa** → o vazamento de carga no trecho, fomenta um alto custo de multas ambientais (Figura 8).

Entretanto, cada vagão possui suas próprias características inerente ao seu histórico de manutenção e tempo de vida, bem como, todos os vagões possuem um limite de vida útil, que é quando eles completam 30 anos e ficam depreciados e entram em desuso.



Figura 7 – Vagão retido na oficina



Figura 8 – Vazamento de carga

Tendo em vista todas estas variáveis, resta a decisão de escolher qual a melhor intervenção executar para cada um dos vagões, em um horizonte de tempo de 10 anos, de modo a minimizar os custos associados as recuperações e riscos, não extrapolando os limites orçamentários e não alocando custos em vagões que entrarão em desuso.

Analisar todos os possíveis cenários para cada um dos vagões é uma tarefa complexa e exaustiva. Desta forma este tipo de decisão torna-se humanamente impossível, uma vez que a avaliação de cada cenário caracteriza um problema de análise combinatória de grandeza exponencial.

Deste modo, a criação das ferramentas computacionais de otimização proporcionou caminhos para observar ao mesmo tempo as diversas possibilidades e variantes de um problema desta categoria.

Baseados nestes conceitos, e diante de um cenário econômico desafiador, a empresa sob estudo foi impulsionada a assumir uma nova postura estratégica, uma vez que a recuperação de vagões demanda um alto custo de investimentos e afetam diretamente as margens de lucro.

## 2.2 Otimização Multiobjetivo

Segundo [4] um problema geral de otimização multiobjetivo pode ser definido como:

$$\min f(x) = (f_1(x), f_2(x), \dots, f_m(x)) \quad (1)$$

$$\text{sujeito a: } x = (x_1, x_2, \dots, x_n) \in F_x \subset X \quad (2)$$

Onde  $x \in X$  é o vetor de decisão,  $X$  é o espaço de parâmetros,  $y \in Y$  é o vetor de objetivos,  $Y$  é o espaço de objetivos, e o conjunto  $F_x$  é o conjunto factível (todos os pontos desse conjunto satisfazem as restrições do problema). Sejam  $y = (y_1, y_2, \dots, y_m)$  as componentes do vetor  $y$  e seja  $F_x$  correspondente à aplicação  $f(\cdot): X \rightarrow Y$  [5].

O conjunto de soluções de um problema multiobjetivo consiste em todos os vetores de decisão para os quais vetores de objetivo correspondentes não podem ser melhorados em alguma dimensão sem uma degradação em alguma outra dimensão. Esse conjunto de soluções é conhecido como conjunto Pareto-ótimo. Formalmente falando, dado dois vetores no espaço de parâmetros,  $a$  e  $b$ ,  $a$  domina  $b$  se, e somente se [4]:

$$\forall i \in \{1, 2, \dots, m\} f_i(a) \leq f_i(b) \quad (3)$$

$$\exists i \in \{1, 2, \dots, m\} f_j(a) < f_j(b) \quad (4)$$

Todos os vetores de decisão que não são dominados por nenhum outro vetor de decisão em um dado conjunto são chamados de não-dominados em relação a esse conjunto. Uma solução Pareto-ótima é um vetor  $x \in F_x$  que é não-dominado em relação ao conjunto factível  $F_x$ . O conjunto Pareto-ótimo é o conjunto de todas as soluções Pareto-ótimas. O gráfico das funções-objetivo cujos vetores não-

dominados pertencem ao conjunto Pareto-ótimo é chamado de Fronteira de Pareto [5].

### 2.3 Método $\epsilon$ -Restrito

Nesta seção será apresentado de forma sucinta a fundamentação da técnica para geração de soluções eficientes em um conjunto pareto ótimo chamada  $\epsilon$ -Restrito.

*Teorema 1: Se  $x^* \in F_x$  é eficiente então existe um inteiro  $i \in \{1, 2, \dots, m\}$  e números reais  $\epsilon_j, j = 1, \dots, m (j \neq i)$  tais que  $x^*$  resolve:*

$$x^* = \arg \min_{x \in F_x} f_i(x) \quad (5)$$

$$\text{sujeito a: } f_j(x) \leq \epsilon_j, j = 1, \dots, m (j \neq i) \quad (6)$$

Conforme descrito em [6] e [7] o teorema 1 garante a existência de soluções não dominadas para o problema multiobjetivo onde escolhe-se uma função para minimização e as outras  $f_j(x)$  funções objetivos são inseridas no modelo como restrições de desigualdade limitadas por um  $\epsilon_j$  de acordo com o exposto nas equações (5) e (6).

Esta abordagem pode apresentar algumas deficiências para a solução de problemas não lineares onde a estrutura gerada passa a ter um conjunto de restrições mais complexa que o problema multiobjetivo original. Entretanto, para este trabalho esta limitação da metodologia não representa nenhuma dificuldade, pois o problema tratado é linear, inteiro e possui restrições lineares.

Por fim, outro inconveniente relatado em [6] é a dificuldade de se definir os valores iniciais, finais e o passo de  $\epsilon$  para a solução do problema. Contudo, este incômodo será mitigado pela utilização das informações prévias do problema.

## 3 IMPLEMENTAÇÃO

O presente trabalho tem como foco determinar o planejamento ótimo de intervenções associados aos custos e riscos de recuperação dos vagões HPE. Estes são utilizados no transporte de Enxofre. Seu fluxo parte dos clientes em Goiás e é transportado por ferrovias até o terminal integrador portuário TIPLAM em São Paulo. Em algumas oportunidades de retorno do trem, é realizado o transporte de Fosfato que retorna até os clientes. Este fluxo integrado pode ser visto conforme na figura 9 abaixo:



Figura 9 – Síntese do fluxo de Transporte Integrado da VLI

Porém, a recuperação destes vagões exige altos investimentos e para viabilizar a execução da estratégia, será amortizado em um planejamento a longo prazo de 10

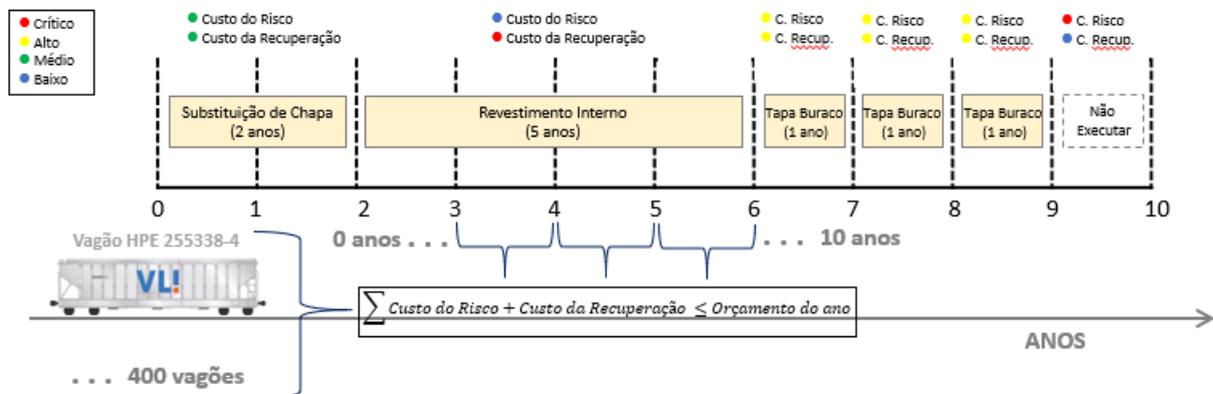
anos. Levando em consideração a limitação anual do ciclo orçamentário, bem como, as características dos planos de intervenções e dos vagões.

Normalmente o horizonte de planejamento das intervenções que serão realizadas em cada um dos vagões, é definido anualmente de forma empírica por um empregado e não leva em consideração a análise dos riscos associados.

No entanto, corre-se o risco dessas recomendações não serem condizentes com o melhor cenário dentre as inúmeras opções disponíveis, uma vez que para levar em consideração todas as restrições do problema se torna humanamente inviável explorar cada um dos cenários desta análise combinatória. Desta forma, grandes oportunidades de redução de custos passam despercebido.

Em vista disto, é fácil perceber a dificuldade em determinar o planejamento individualizado dos vagões, que minimize os custos das intervenções e mensuração dos riscos. Dentre estas, podemos destacar: **a)** Grande número de ativos, o que dificulta uma análise individualizada por vagão; **b)** Dificuldade em mensurar os impactos operacionais associados aos riscos e **c)** Alta complexidade para a alocação ótima dos custos de recuperação em um horizonte de 10 anos.

Esta situação demonstra a alta complexidade do problema desta categoria e a necessidade em se desenvolver uma ferramenta computacional de otimização para suporte à tomada de decisão. A figura 10 abaixo ilustra a complexidade do problema:



Para tanto, busca-se modelar a aplicação como um problema de otimização multiobjetivo e posteriormente desenvolver um algoritmo de programação linear inteira (PLI) auxiliado pela abordagem do  $\epsilon$ -Restrito, para buscar os resultados ótimos do problema.

Com isso será possível visualizar os possíveis cenários de trade-off em uma fronteira pareto ótimo, a qual o usuário poderá selecionar o cenário que melhor atende a relação de custos adequado ao plano de negócios da VLI.

Desta forma, a metodologia adotada neste trabalho, pode ser estruturada e resumida em 5 etapas, como pode ser observado na figura 11:

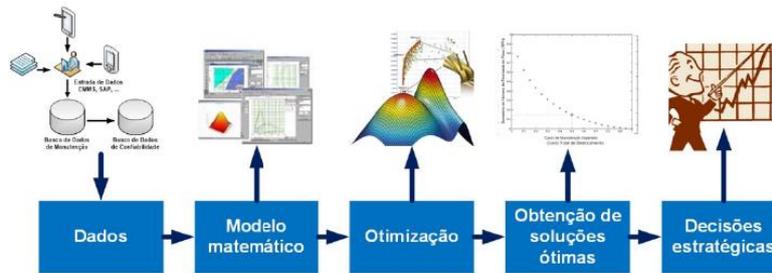


Figura 11 – Estrutura da metodologia

### 3.1 Dados

A fim de se preservar informações sensíveis da empresa, os valores contidos neste trabalho serão normalizados de 0 a 1, dividindo-se os valores obtidos pelo máximo valor encontrado para cada variável.

Foram utilizados os seguintes dados para a otimização:

- período observado de 10 anos;
- 400 vagões HPE;
- informações, idade e histórico de falhas de cada vagão;
- vida útil do vagão definida como 30 anos.

Também foi definido os valores dos custos, utilizando como unidade de medida o menor valor de intervenção, que é o TB (Tapa Buraco), conforme listado a seguir:

- “Não Executar” possui o custo de 0TB e um tempo de 12 meses;
- “Tapa Buraco” possui o custo de TB e duração de 4 meses;
- “Substituição de Chapara” possui um custo de 20TB e duração de 24 meses;
- “Revestimento Interno” possui o custo de 35TB e duração de 48 meses.

Por fim foram definidos os dados de risco, como unidade de medida o menor valor de intervenção dos riscos, que é o R (retenção) como:

- Retenção com o menor custo com valor “R” e probabilidade de retenção inerente a cada vagão;
- Multa com o valor de 35 R e probabilidade também inerente a cada vagão.

Foi necessário a criação da intervenção “Não Executar”, em coerência ao modelo matemático proposto e linguagem de programação utilizada.

Foi construído modelos da estimativa de probabilidade de falha (vagão retido) e multa (vazamento de produto) para cada um dos vagões utilizando o histórico de falhas e estimativa de vida de cada intervenção.

Os modelos de probabilidade foram estimados através da distribuição de Weibull, que é um método utilizado para modelagem da previsibilidade da vida de um produto, tendo em conta sua idade e horizonte de vida útil.

Para a definição do parâmetro  $\beta$  da distribuição de Weibull foi utilizado o valor  $\beta \gg 1$  que representa a mortalidade senil. Este período corresponde à fase final de vida do item, marcada pelo desgaste do componente, por corrosão, fadiga, trincas, deterioração, entre outros.

Tendo estas informações, é possível chegar ao cálculo dos custos de intervenção risco de cada vagão.

### 3.2 Modelagem do Problema

O problema proposto foi modelado conforme a expressão (7) como um problema de otimização multiobjetivo, cujas funções objetivo são minimizar o custo total de intervenções e o custo total do risco.

No qual, o custo de intervenção total é a soma dos custos das intervenções  $k$  adotadas para todos os vagões  $j$  em cada ano  $i$  e o risco é calculado a partir da aplicação das  $k$  intervenções para todos os vagões  $j$  em cada ano  $i$ , conforme as equações (8) e (9).

O custo do risco é definido na equação (10) através da soma entre o custo da probabilidade da multa ocorrer no vagão  $j$  com a intervenção  $k$  no ano  $i$ , mais, através da soma entre o custo da probabilidade da indisponibilidade no vagão  $j$  com a intervenção  $k$  no ano  $i$ .

$$\min f(x) = (f_1(x), f_2(x)) \quad (7)$$

Funções objetivos:

$$f1 = \sum_{i=1}^{nAno} \sum_{j=1}^{nVag} \sum_{k=1}^{nInt} CI_k \cdot X_{ijk} \quad (8)$$

$$f2 = \sum_{i=1}^{nAno} \sum_{j=1}^{nVag} \sum_{k=1}^{nInt} CR_{ijk} \cdot X_{ijk} \quad (9)$$

Em que:

$$CR_{ijk} = (CM \cdot PM_{ijk}) + (CD \cdot PD_{ijk}) \quad (10)$$

Sujeito a:

$$\sum_{i=N}^{N+T-1} X_{ijk} \leq 1 \quad \forall j \in N, k = 3 \mid T = 2 \quad \forall N \in \{1, \dots, 9\} \quad (11)$$

$$\sum_{i=N}^{N+T-1} X_{ijk} \leq 1 \quad \forall j \in N, k = 4 \mid T = 3 \quad \forall N \in \{1, \dots, 7\} \quad (12)$$

$$X_{ij1} = 1 \quad \forall i, j \mid i + TV_j > VU \quad (13)$$

$$\sum_{j=1}^{nVag} \sum_{k=1}^{nInt} CI_k \cdot X_{ijk} \leq Or\zeta_i \quad \forall i \in nAnos \quad (14)$$

$$\sum_{k=1}^4 X_{ijk} = 1 \quad \forall i, \forall j \quad (15)$$

$$X_{ijk} = \begin{cases} 0 & \text{está no plano} \\ 1 & \text{não está no plano} \end{cases} \quad (16)$$

Onde:

**nAno**: número de anos; **nVag**: número de vagões; **nInt**: número de intervenções; **CI<sub>k</sub>**: custo da intervenção; **X<sub>ijk</sub>**: variável de decisão; **CR<sub>ijk</sub>**: custo do risco; **CM**: custo da multa; **PM<sub>ijk</sub>**: probabilidade de multa; **CD**: custo da indisponibilidade de vagão; **PD<sub>ijk</sub>**: probabilidade da indisponibilidade de vagão; **N**: variável auxiliar; **T**: variável auxiliar; **TV<sub>j</sub>**: tempo de vida do vagão; **VU**: vida útil dos vagões; **Orç<sub>i</sub>**: orçamento no ano.

As restrições (11), (12), (13), (14), (15) e (16) garantem que:

- (11) e (12): garante que a execução da intervenção III não se repita a cada 2 anos e intervenção IV não se repita a cada 4 anos;
- (13): garante a execução da intervenção 1 (não executar) sempre que o tempo de vida do vagão *j* + a duração da intervenção *i* for maior que a vida útil;
- (14): garante que o custo total das intervenções no ano *i* seja menor ou igual ao orçamento do ano *i*;
- (15): garante que uma única política de intervenção seja atribuída a cada vagão;
- (16): variável binária que indica a aplicação ou não da intervenção *k* ao vagão *j* no ano *i*.

### 3.3 Arquitetura do Algoritmo

Para a resolução do problema foi proposto o desenvolvimento de um algoritmo baseado na utilização do solver GUROBI juntamente com a linguagem de programação C# (Figuras 12 e 13). Pois são ferramentas utilizadas e autorizadas da empresa. Além destas ferramentas também foi utilizado o excel para efetuar o “input” dos dados de entrada.

A resolução de problemas algoritmos exatos tem como característica comum a otimização de apenas um objetivo, conforme apresentado em [8]. Com isso, faz-se necessário utilizar uma abordagem que permita mapear uma parte relevante da fronteira de Pareto. Para tanto, neste trabalho utilizou-se a abordagem do ε-Restrito, apresentado na seção (2.3). Com isso foi definido que a função objetivo que trata o custo das intervenções se tornaria uma restrição do problema, conforme a equação (16).

$$\sum_{i=1}^{nAno} \sum_{j=1}^{nVag} \sum_{k=1}^{nInt} CI_k \cdot X_{ijk} \leq \epsilon_k \quad (16)$$

Na equação (16), o termo  $\epsilon_k$  refere-se ao valor máximo que a restrição pode alcançar. Com isso, esse valor irá variar entre um valor mínimo e um valor máximo a serem definidos de acordo com o custo de cada uma das intervenções, bem como, com a quantidade de vagões e anos a serem analisados.

Com os limites inferior e superior de  $\varepsilon_k$  definidos, o próximo passo é definir qual o valor do incremento do mesmo. Após calibrações do algoritmo, foi definido que o  $\varepsilon_k$  seria incrementado com um valor de dez vezes o custo da intervenção mais baixa. Isso fez com que o algoritmo conseguisse mapear uma boa quantidade de pontos na fronteira Pareto, garantindo diversidade de soluções.

Após a leitura de cada um dos arquivos de entrada (dados), o próximo passo, é iniciar a configuração do solver GUROBI, utilizando os dados processados e definidos até o momento.

Para cada otimização é verificado se o método encontrou uma solução ótima. Caso tenha encontrado, a mesma é armazenada em um arquivo externo. Na sequência é feito o incremento do valor de  $\varepsilon_k$  e executado o solver novamente, até que o valor máximo seja alcançado, finalizando a execução da estrutura de repetição.

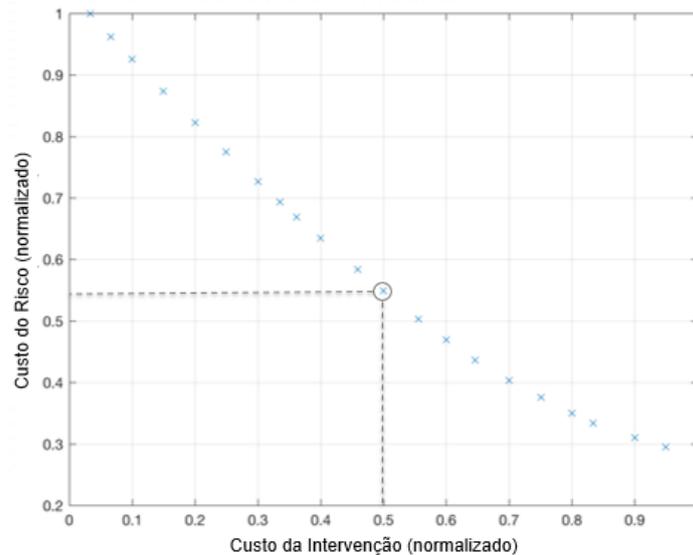
#### 4 RESULTADOS ESPERADOS

Como resultado o algoritmo gera uma matriz de soluções não dominadas que é representada por um vetor de 400 posições onde cada linha representa um vagão e cada coluna representa o ano de planejamento. De forma que o valor em cada posição tenha o valor 1, 2, 3 ou 4, sendo que estes valores remetem aos quatro tipos de intervenção pré-definidos: 1 – Não executar; 2 – Tapa Buraco, 3 – Substituição de Chapa e 4 – Revestimento Interno. Conforme a Figura 14:

	ano 1	ano 2	ano 3	ano 4	ano 5	ano 6	ano 7	ano 8	ano 9	ano 10
vagão 1	4	1	1	1	4	1	1	1	3	1
vagão 2	2	2	3	1	2	1	1	1	1	1
vagão 3	4	1	1	1	2	3	1	1	1	1
⋮										
400 vagões										400 vagões

Figura 14 – Matriz de resultados

Através de uma simulação prévia, foi possível analisar o resultado da fronteira Pareto ótimo, onde cada um dos pontos da Figura 15 representam uma solução composta pela combinação de intervenções ao longo dos 10 anos para cada um dos 400 vagões.



**Figura 15** – Solução prévia selecionada na fronteira pareto ótimo para análise

Deste modo, foi selecionado uma solução conservadora que busca uma relação de equilíbrio entre os custos de intervenção e risco, para analisar e comparar com o método empírico até então utilizado. A solução utilizada para a análise de comparação prévia foi destacada na Figura 15.

A solução selecionada apresentou uma expectativa de redução 20% dos custos de recuperação de vagões do enxofre para o ciclo orçamentário de 10 anos. Mostrando uma economia expressiva devido ao alto valor agregado a estes investimentos.

## 5 CONCLUSÃO

Este trabalho proporcionou o desenvolvimento de uma metodologia para a otimização dos custos das intervenções e riscos associados aos vagões degradados no transporte de enxofre. Sendo capaz de analisar um grande número de vagões e definir cenários de alocação ótima dos custos para tomada de decisão, o que seria humanamente impossível de se analisar manualmente em tempo hábil.

Estes processos e conceitos estão orientados a garantir ativos disponíveis e confiáveis, buscando maior eficácia na aplicação dos recursos e uma relação de custos adequado ao plano de negócios da VLI, garantido assim um alto nível de excelência e de segurança para os seus clientes.

Através da metodologia implementada, foi possível analisar previamente os resultados para o ciclo orçamentário de 10 anos, apresentando uma expectativa de redução de custos em 20% em uma seleção de cenário conservador, em comparação com método empírico atualmente utilizado.

## AGRADECIMENTOS

Este trabalho teve o suporte financeiro das agências CAPES, CNPq e FAPEMIG. Fica também o agradecimento a empresa VLI pelo tempo disponibilizado e pelo suporte para a realização deste trabalho.

## REFERÊNCIAS

- 1 Wendland, L. S.; Tauchen, J. Gestão estratégica da manutenção. FAHOR, 2010.
- 2 Kardek, A.; Nascif, J. Manutenção – função estratégica. 4rd ed., São Paulo, 2012.
- 3 Aplicação de técnicas de otimização nos processos produtivos das empresas. Acessado em 2016. Disponível em: <http://www.ilab.com.br>
- 4 Farias, M.S.R, Goldbarg, M.C. Luna, H.P.L. Aplicação de um Algoritmo Evolucionário de Busca de Soluções de Pareto Para o Problema do Caixeiro Viajante Biobjetivo, XL SBPO, João Pessoa, PB, 2008.
- 5 Azuma, R.M. Otimização Multiobjetivo em Problema de Estoque e Roteamento Gerenciados pelo Fornecedor, Dissertação de mestrado, Campinas, SP, 2011.
- 6 Takahashi, R.H.C., Diniz, H.E.P. and Carrano, E.G., Otimização Escalar e Vetorial – Volume 1: Conceitos Preliminares, Notas de Aula, OTEVVol1. Belo Horizonte, MG, 2007.
- 7 Batista, L.S., Carrano, E.G. and Guimarães, F.G. Otimização Multiobjetivo – Métodos Escalares (Método "-Restrito), Notas de Aula, DEE/UFMG. Belo Horizonte, MG, 2016.
- 8 Campelo, F., Batista, L.S., Takahashi, R.H.C., Diniz, H.E.P. and Carrano, E.G., Multicriteria transformer asset management with maintenance and planning perspectives, in IET Generation, Transmission & Distribution, vol. 10, no. 9, pp. 2087-2097, 6 9 2016.