

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL - TRANSPORTES

DIOGO FURTADO DE MOURA

**PRIORIZAÇÃO DA MANUTENÇÃO DE SUPERESTRUTURA
FERROVIÁRIA ATRAVÉS DE PROGRAMAÇÃO POR METAS**

VITÓRIA

2018

DIOGO FURTADO DE MOURA

**PRIORIZAÇÃO DA MANUTENÇÃO DE SUPERESTRUTURA
FERROVIÁRIA ATRAVÉS DE PROGRAMAÇÃO POR METAS**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Engenharia Civil do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil – Área de Concentração em Transportes.

Orientador: Prof. Dr. Gregório C. de Moraes Neto

VITÓRIA

2018

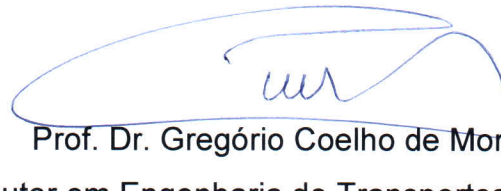
UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

Diogo Furtado de Moura

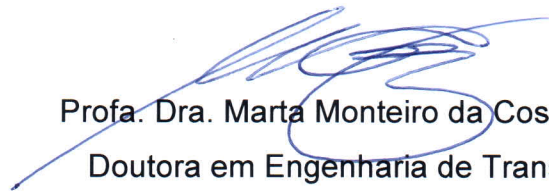
PRIORIZAÇÃO DA MANUTENÇÃO DE SUPERESTRUTURA FERROVIÁRIA ATRAVÉS DE PROGRAMAÇÃO POR METAS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil - Transportes.

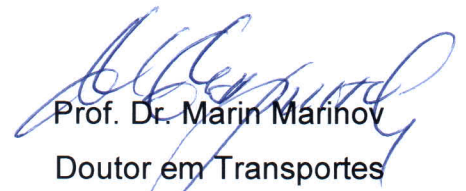
Aprovada em 28/11/2018, por:



Prof. Dr. Gregório Coelho de Moraes Neto
Doutor em Engenharia de Transportes - UFES
Orientador



Profa. Dra. Marta Monteiro da Costa Cruz
Doutora em Engenharia de Transportes
Examinadora Interna – UFES



Prof. Dr. Marin Marinov
Doutor em Transportes
Examinador Externo - Newcastle University - UK

RESUMO

Definir a estratégia adequada de manutenção é tarefa essencial para a ferrovia que almeja longevidade em seus negócios e busca alcançar objetivos de longo prazo. Em muitos casos, essa tarefa envolve objetivos múltiplos, incomensuráveis e conflitantes. Esse artigo apresenta uma ferramenta que permite priorizar a manutenção de superestrutura ferroviária a partir de um cenário de demanda de manutenção de componentes e características geométricas, ambientais e demográficas existentes ao longo do traçado da via. Dentre as técnicas de otimização para auxiliar a tomada de decisão existentes, a Programação por Metas foi utilizada por permitir a existência de objetivos múltiplos. Os resultados obtidos demonstraram que o modelo proposto possibilitou a priorização das metas definidas como mais importantes e se mostrou útil na apresentação de cenários que facilitam a escolha dos locais de manutenção de superestrutura.

Palavras-Chaves: Programação por Metas, Manutenção Ferroviária, Superestrutura Ferroviária.

ABSTRACT

Defining the proper maintenance strategy is an essential task for the railroad that seeks longevity in its business and seeks to achieve long-term goals, involving multiple, often immeasurable and conflicting objectives. This article presents a tool that allows prioritizing the maintenance of the railway superstructure based on a scenario of demand for maintenance of components and geometric, environmental and demographic characteristics that exist along the path of the track. Among the optimization techniques to aid in the decision-making process, Goal Programming was used to allow the existence of multiple objectives. The results showed that the proposed model allowed the prioritization of the goals defined as the most important and it proved useful in the presentation of scenarios that facilitate the choice of the superstructure maintenance sites.

Palavras-Chaves: Goal Programming, Railway Maintenance, Railway Superstructure.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Mapa Ferroviário Brasileiro	10
Figura 2 – Evolução do transporte de cargas ferroviárias no Brasil	11
Figura 3 – Acidentes ferroviários no transporte de cargas no Brasil, por causa	11
Figura 4 – Componentes da superestrutura ferroviária	15
Figura 5 – Perfil Vignole	16
Figura 6 – O processo de Tomada de Decisão	26
Figura 7 – Publicações em PM entre os anos de 1955 e 1987	34
Figura 8 – Evolução da aplicação da PM por disciplina	35
Figura 9 – Escala numérica para medir objetivos quantitativos.....	40
Figura 10 – Escala numérica para o fator de gravidade do local do defeito.....	45
Figura 11 – Janela de edição dos parâmetros do <i>Solver</i>	53
Figura 12 – Planilha eletrônica do modelo, com o primeiro cenário simulado.....	54
Figura 13 – Desvios percentuais verificados em cada cenário, por meta	58

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Ficha técnica das principais ferrovias de carga do Brasil, em 2015	19
Quadro 2 – Transformação de objetivos em metas.....	28
Quadro 3 – Estratificação de pesquisas por metodologia e área de aplicação	36
Quadro 4 – Objetivos específicos do segundo nível	43
Quadro 5 – Objetivos específicos do terceiro nível	44
Quadro 6 – Valores unitários de referência.....	50
Quadro 7 – Parâmetros da ferrovia simulada.....	50
Quadro 8 – Parâmetros de defeitos da distribuição triangular	50
Quadro 9 – Metas do modelo proposto	51

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Aplicações da PM em Transportes entre 1990 e 2000.....	34
Tabela 2 – Exemplo de atributos de alternativas de aplicação de materiais	39
Tabela 3 – Atributos em uma mesma escala	40
Tabela 4 – Resultados do primeiro cenário simulado.....	55
Tabela 5 – Resultados do segundo cenário simulado	55
Tabela 6 – Resultados do terceiro cenário simulado.....	56
Tabela 7 – Resultados do quarto cenário simulado	56
Tabela 8 – Dados da ferrovia simulada	64

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
1.1	Objetivos	12
1.1.1	Objetivo Geral	12
1.1.2	Objetivos Específicos	13
1.2	Estrutura do Trabalho	13
2	A VIA PERMANENTE FERROVIÁRIA	14
2.1	Infraestrutura Ferroviária	14
2.2	Superestrutura Ferroviária	14
2.2.1	Trilhos	15
2.2.2	Dormentes.....	16
2.2.3	Lastro	17
2.2.4	Elementos de Fixação	18
2.3	Principais Ferrovias de Carga Brasileiras	18
2.3.1	Vale	19
2.3.2	Ferrovia Centro Atlântica.....	19
2.3.3	Rumo Logística	20
2.3.4	MRS	20
2.4	Manutenção Ferroviária	21
2.4.1	Aperfeiçoamento dos Componentes de Via	22
2.4.2	Melhoria nos processos de manutenção ferroviária	23
3	PROGRAMAÇÃO POR METAS	25
3.1	Terminologia	28
3.2	Variações da Programação por Metas	30
3.3	Aplicações da Programação por Metas	33
3.4	Método da Utilidade Associada	39
4	O MODELO PROPOSTO	42
4.1	Metodologia	42

4.2	Definição dos Objetivos	43
4.3	Estimativa do Índice de Risco	44
4.4	Transformação dos Objetivos em Metas	45
4.5	Formulação da Função Execução	47
5	APLICAÇÃO DO MODELO.....	49
5.1	Considerações Iniciais	49
5.2	Dados do Modelo	49
5.2.1	Dados Gerais	50
5.2.2	Composição do Índice de Risco	51
5.2.3	Parâmetros do <i>Solver</i>	52
5.3	Resultados do Modelo.....	53
5.4	Análise dos Resultados.....	57
6	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	59
7	REFERÊNCIAS	61
8	ANEXO	64

1 INTRODUÇÃO

O modal ferroviário caracteriza-se, especialmente, por sua capacidade de transportar grandes volumes, com elevada eficiência energética, principalmente em casos de deslocamentos a médias e grandes distâncias. Apresenta, ainda, maior segurança, em relação ao modal rodoviário, com menor índice de acidentes e menor incidência de furtos e roubos (ANTT, 2016).

Atualmente a malha ferroviária brasileira, representada na Figura 1, tem uma extensão de 28.190 km, com grande parte concentrada nas regiões sul e sudeste do país e predominância do transporte de cargas (Ministério dos Transportes, 2016).

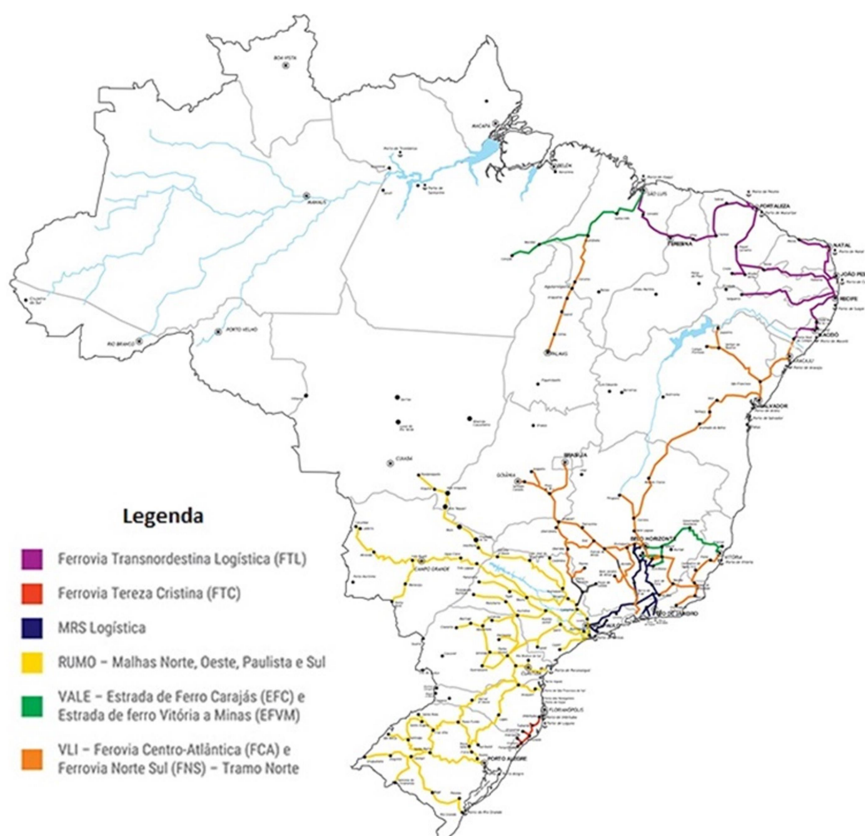


Figura 1 – Mapa Ferroviário Brasileiro

Fonte: ANTF, 2016

Os dados disponibilizados pela ANTT indicam um crescimento consistente no transporte ferroviário de cargas brasileiro ao longo da última década. De 2006 a 2017, o aumento no volume útil escoado nas ferrovias nacionais foi de quase 40%, como mostra a Figura 2.

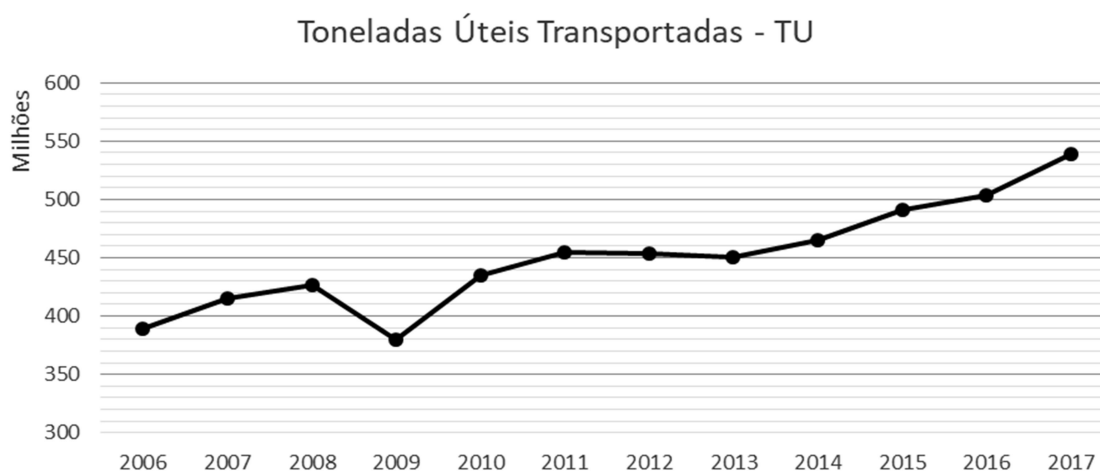


Figura 2 – Evolução do transporte de cargas ferroviárias no Brasil

Fonte: ANTT, 2018

Nos últimos seis anos, ocorreram um total de 6.040 acidentes envolvendo trens de cargas. Deste total, cerca de metade dos acidentes ferroviários ocorreram devido fatores externos, envolvendo terceiros em ocorrências como atropelamentos, atos de vandalismo e abalroamentos com veículos terrestres. Dentre os fatores internos, a principal causadora de acidentes ferroviários foi a via permanente, que contribuiu para a ocorrência de 1.843 acidentes ferroviários entre 2006 e 2017. O gráfico da Figura 3 apresenta a estratificação das principais causas dos acidentes ferroviários ocorridos no Brasil entre 2011 e 2017.

Acidentes no Transporte Ferroviário de Cargas (2011 a 2017), por Causa

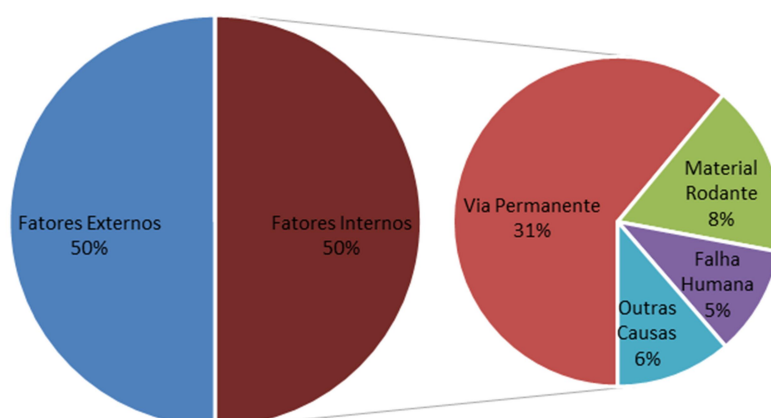


Figura 3 – Acidentes ferroviários no transporte de cargas no Brasil, por causa

Fonte: ANTT, 2018

Segundo Vargas (2010), um dos principais desafios das organizações está na capacidade de fazer escolhas certas e consistentes em relação ao próprio direcionamento estratégico, o que envolve a definição de objetivos, muitas vezes conflitantes, que possam direcionar à melhor forma de executar a manutenção conforme a disponibilidade de recursos. Uma das formas de simplificar a tomada de decisão é por meio de algum método de otimização.

Neste trabalho é estudado um método de priorização da manutenção de superestrutura ferroviária através de uma análise multicritério de tomada de decisão. A técnica adotada para facilitar a tomada de decisão no processo é a Programação por Metas (*Goal Programming*), proposta por Charnes e Cooper (1961) que trata de forma diferente as possíveis restrições relacionadas ao problema que podem ser consideradas flexíveis, de modo a permitir valores próximos aos estabelecidos, previamente, como metas. A melhor solução é então calculada buscando-se minimizar os desvios dessas metas, definidos como variáveis auxiliares.

1.1 Objetivos

Os objetivos constituem a finalidade do trabalho científico, ou seja, a meta que se pretende atingir com a elaboração da pesquisa. Objetivo geral é aquele mais amplo, que representa a meta de longo alcance e reúne as contribuições a serem oferecidas com a execução da pesquisa. Já os objetivos específicos representam a delimitação de metas mais específicas do trabalho, conduzindo a pesquisa ao objetivo geral.

1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo geral do trabalho é desenvolver uma ferramenta para a priorização da manutenção de superestrutura ferroviária, através da utilização de Programação por Metas, a partir de um cenário de demanda de manutenção de componentes de via e características específicas como geometria, meio ambientais e demografia encontrados ao longo do traçado da via.

1.1.2 Objetivos Específicos

A partir do objetivo geral, é esperado que os seguintes objetivos específicos também sejam atendidos:

- Identificar critérios de manutenção dos componentes de superestrutura ferroviária;
- Identificar parâmetros de priorização na manutenção ferroviária;
- Modelar o problema pelo método de Programação por Metas;
- Aplicar o modelo proposto em uma ferrovia simulada a partir de dados fictícios;
- Gerar diferentes resultados a partir da alteração dos critérios de priorização;
- Avaliar os resultados e a aplicabilidade do modelo em casos reais.

A ferramenta proposta será desenvolvida no suplemento *Solver* do *Microsoft Excel*, devido à facilidade na entrada e alteração de dados para a geração de diferentes cenários e por se tratar de software difundido comercialmente.

1.2 Estrutura do Trabalho

No primeiro capítulo são apresentados os objetivos e justificativa do trabalho, além da estrutura como um todo. No segundo capítulo serão apresentados os conceitos que envolvem as ferrovias bem como as principais ferrovias de transporte cargas brasileiras. O terceiro capítulo irá apresentar a revisão bibliográfica sobre tomada de decisão com objetivos múltiplos, especificamente a respeito de Programação por Metas. No quarto capítulo será apresentado o modelo proposto para priorização da manutenção ferroviária em uma ferrovia hipotética de cargas brasileira. Esse modelo será aplicado no quinto capítulo, onde serão apresentados os critérios e recursos disponíveis para priorização. O sexto capítulo apresentará as conclusões do trabalho e as recomendações para desenvolvimentos futuros.

2 A VIA PERMANENTE FERROVIÁRIA

A Via Permanente (VP) de uma ferrovia é apenas uma das partes que compõe o patrimônio de uma empresa prestadora de serviços de transporte ferroviário de cargas e passageiros, sendo então o “suporte físico” para o transporte terrestre ferroviário (NETO, 2010).

A ideia básica da VP é que se garantindo características aceitáveis de suporte, pista de rolamento e guia de material rodante que trafega sobre ela, a geometria original da via deveria ser mantida dentro de tolerâncias e em condições estáveis ao longo do tempo (MUNIZ, 2011).

A via permanente ferroviária divide-se em infraestrutura e superestrutura. A superestrutura é composta por lastro, dormentes, fixações e trilhos. Tudo aquilo que estiver sob a superestrutura é considerado infraestrutura (GREGORACCI, 2006).

2.1 Infraestrutura Ferroviária

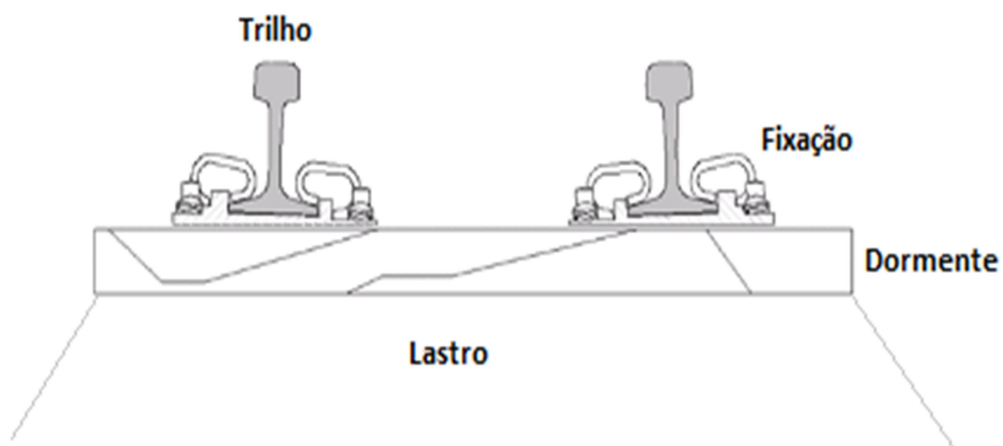
A Infraestrutura Ferroviária é composta pelas obras de terraplenagem ou movimentação do solo por intermédio de cortes e aterros, elementos de drenagem responsáveis por retirar e encaminhar as águas que precipitam sobre a superestrutura e infraestrutura (bueiros, galerias, drenos, etc.) e obras de arte especiais que são estruturas que, pelas suas proporções e características peculiares, requerem um projeto específico. Os itens que compõem a infraestrutura são situados, normalmente, abaixo do greide de terraplenagem (GREGORACCI, 2006).

2.2 Superestrutura Ferroviária

A superestrutura ferroviária é constituída pela interação de quatro elementos para suprimento das condições adequadas de suporte, rolamento e guia para o material rodante a ser trafegado sobre ela (MAGALHAES, 2011b).

Os elementos que compõem a superestrutura são: lastro, dormentes, elementos de fixação e trilhos. O esquema da Figura 4 apresenta os componentes da superestrutura da ferrovia.

Figura 4 – Componentes da superestrutura ferroviária



Fonte: Vale, 2009.

2.2.1 Trilhos

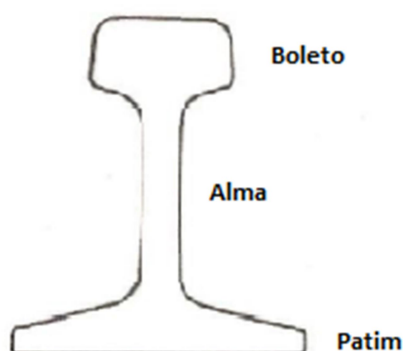
Trilho é o elemento da superestrutura que constitui a superfície de rolamento para as rodas dos veículos ferroviários servindo-lhes, ao mesmo tempo, de apoio e guia (NETO, 2010).

A forma e o comprimento das peças componentes dos trilhos evoluíram gradativamente com o passar do tempo até alcançarem as modernas seções e pesos por metro, suportando assim as grandes cargas por eixo dos trens modernos (NETO, 2010).

Por ser mais econômica e eficiente, estruturalmente, a seção em duplo "T", foi adotada desde o início do desenvolvimento do transporte ferroviário. Devido ao grande desgaste a que está sujeito pelo atrito com as rodas, o perfil do trilho evoluiu para uma seção em que a mesa superior passou a ter espessura, consideravelmente, maior que a da alma, para permitir seu uso continuado, mesmo após longo tempo de serviço. Por volta de 1900, o trilho de aço com seção T já havia substituído todos os outros tipos de trilho presentes nas estradas de ferro nos Estados Unidos. Porém, as dificuldades encontradas para fixação desse perfil fizeram com que fosse o mesmo abandonado, em

favor do perfil idealizado, anteriormente, pelo engenheiro inglês Vignole (1836) que, basicamente, compunha-se de três partes: boleto, alma e patim como mostrado na Figura 5 (NETO, 2010).

Figura 5 – Perfil Vignole



Fonte: Neto (2010).

Os trilhos são os componentes ferroviários mais suscetíveis à falha devido a fatores como: alta pressão de contato das rodas em regime de carregamento cíclico e existência de tensões residuais, provocados por deformação plástica superficial, por processos de fabricação e soldagem e por variação térmica na linha (GREGORACCI, 2006).

Existem diversos fatores que podem influenciar na duração prevista do trilho ferroviário. A vida útil é afetada principalmente pela composição química do trilho, programas de manutenção da via férrea, velocidade e tonelagem. Todos estes fatores influenciam no desenvolvimento de desgaste vertical e lateral do boleto, no fluxo de deformação plástica ou deformação no topo do boleto e desenvolvimento de defeitos do trilho (FEDERAL RAILROAD ADMINISTRATION, 2011).

2.2.2 Dormentes

Magalhães (2011b) define dormente como o elemento situado na direção transversal ao eixo principal da via, posicionado entre os trilhos e o lastro.

Analisando de modo estrutural, os dormentes são vigas que recebem duas cargas concentradas verticais transmitidas pelos trilhos distribuindo-as sobre o lastro. Além disso, os dormentes também são os principais responsáveis por garantir o

posicionamento de equidistância dos trilhos, permitindo as funções de guia e de pista de rolamento da linha. Esse último resultado é possível pelo efeito da fixação dos trilhos nos dormentes (MAGALHAES, 2011b).

Segundo Magalhães (2011b) as principais funções a serem desempenhadas pelos dormentes são:

- Servir de suporte aos trilhos, garantindo fixação e assegurando sua posição em nível, inclinação e separação relativa entre os trilhos (bitola da linha);
- Absorver cargas verticais e horizontais dos trens, transmitidas pelos trilhos, distribuindo os esforços sobre o lastro pela superfície de apoio;
- Manter a estabilidade da via nos planos vertical e horizontal, tendo em vista os esforços dinâmicos que surgem devido ao movimento dos trens, estáticos devido ao próprio peso da estrutura e aqueles gerados pela variação da temperatura;
- Manter isolamento elétrico entre os trilhos.

Usualmente, o principal material utilizado como dormente é a madeira, porém existem outros materiais sendo cada vez mais requisitados como o concreto, o aço e, mais recentemente, o compósito plástico.

2.2.3 Lastro

Segundo Magalhães (2011b), lastro é o elemento da superestrutura situado entre os dormentes e o leito, ou sublastro caso exista, e possui as seguintes funções especiais:

- Distribuir, convenientemente, sobre a plataforma os esforços resultantes das cargas dos veículos, produzindo uma taxa de trabalho compatível com a capacidade de carga da mesma;
- Formar um suporte, até certo ponto elástico, atenuando as trepidações resultantes da passagem dos veículos;
- Sobrepondo-se à plataforma, suprimir suas irregularidades, formando uma superfície contínua e uniforme, para os dormentes e trilhos;
- Impedir os deslocamentos dos dormentes quer no sentido longitudinal, quer no sentido transversal;

- Facilitar a drenagem da superestrutura.

2.2.4 Elementos de Fixação

Elementos de fixação são as estruturas que ligam o trilho ao dormente, estabelecendo determinada forma de vínculo estrutural entre ambos os componentes. Além de fixar o trilho ao dormente, deve garantir a correta medida da bitola e ajustar a transferência dos esforços dinâmicos e estáticos exercidos pelo material rodante sobre a via permanente (PEDRONI, 2008).

Existem diversos tipos de fixações de trilhos nos dormentes, mas geralmente estas fixações são separadas em dois tipos: fixações rígidas ou fixações elásticas.

Pedroni (2008) define fixações rígidas como aquelas que não apresentam deformação no momento da passagem das composições ferroviárias. Segundo o autor, essas fixações têm como principal desvantagem a dificuldade e baixa produtividade da mão de obra na instalação desta fixação.

Ainda de acordo com Pedroni (2009) fixações elásticas são fixações que apresentam pequena deformação no momento da passagem da composição ferroviária, sendo capaz de absorver choques e vibrações. Ele cita a vantagem da utilização dessa fixação como sendo a facilidade de aplicação e, conseqüentemente, a alta produtividade da mão de obra no momento da aplicação das barras de trilho.

2.3 Principais Ferrovias de Carga Brasileiras

O foco do presente trabalho é concentrado nas ferrovias de carga brasileiras. Apesar de não possuírem a agilidade e a capilaridade presentes no modal rodoviário, as ferrovias proveem transporte mais barato para grandes volumes de carga em percursos de longa distância, além de facilitar o uso de grandes terminais privativos. Sua vantagem competitiva é maior quando operam em corredores especializados, com trens unitários e carga homogênea. Trata-se do modal mais indicado para cargas a granel, como grãos e minérios, e mesmo quantidades expressivas de contêineres, nos corredores de longo percurso.

O transporte ferroviário de cargas no Brasil se concentra principalmente em quatro empresas: Vale, Rumo, MRS e Ferrovia Centro Atlântica. Dos 26.860 km de estradas de ferro em território nacional em levantamento de 2015 que estão em condições operacionais, as quatro empresas possuíam juntas 22.768 km – ou 84,8% do total conforme o Anuário RF (2016). Essas empresas foram responsáveis pelo transporte de 97,7% de toda a carga que passou pelos trilhos nacionais em 2017 - ou 526,4 milhões de toneladas das 538,8 milhões de toneladas transportadas. (ANTT, 2018).

Quadro 1 – Ficha técnica das principais ferrovias de carga do Brasil, em 2015

Ferrovia	Extensão (km)	Investimento (R\$ MM)	Equipe	Terminais	Portos	Oficinas	Clientes
Vale	1.884	4.566,2	*	89	3	9	6
FCA	7.220	501,1	5.424	6	2	19	44
Rumo	12.021	1.950,7	13.066	121	4	6	148
MRS	1.643	703,0	6.166	121	5	13	92

Fonte: Anuário RF (2016)

2.3.1 Vale

A Vale possui duas estradas de ferro, a Estrada de Ferro Vitória-Minas (EFVM) e a Estrada de Ferro Carajás. A EFVM possui extensão de 905 quilômetros que conecta as operações de minério de ferro do interior de Minas Gerais ao Porto de Tubarão no Espírito Santo e transporta o próprio minério de ferro da Vale e carga geral para terceiros (como carvão e produtos agrícolas). A EFC possui 892 quilômetros conectando as Minas de Carajás, no Pará, ao Terminal Marítimo de Ponta da Madeira, no Maranhão e transporta minério de ferro, ferro-gusa, manganês, cobre, combustíveis e carvão.

2.3.2 Ferrovia Centro Atlântica

A Ferrovia Centro Atlântica, mais conhecida como FCA, é uma empresa privada pelo grupo VALE em 1 de setembro de 1996 assumindo parte da malha privatizada da RFFSA que através de negociação com a Ferrobán assumiu parte da Fepasa. Em abril 2014 a Vale concluiu a venda de 20% e 15,9% da VLI, grupo criado para englobar a

FCA em conjunto com portos e terminais próprios, para, respectivamente, Mitsui e FI-FGTS. Em agosto foi a vez da Brookfield Asset Management arrematar 26,5% da VLI, tirando a Vale do controle da mesma.

Com 7.220 quilômetros de extensão, a ferrovia passa por 316 municípios, em sete estados brasileiros (Minas Gerais, Espírito Santo, Rio de Janeiro, Sergipe, Goiás, Bahia, São Paulo) e Distrito Federal. É o principal eixo de integração entre as regiões Sudeste, Nordeste e Centro-oeste. Destaca-se como uma rota importante para o fluxo logístico de carga geral, por meio de suas conexões com outras ferrovias, cujas cargas se destinam ao Porto de Santos (SP), permitindo o acesso aos maiores centros consumidores do país.

2.3.3 Rumo Logística

A Rumo Logística surgiu como resultado de uma fusão entre o Grupo Cosan e a antiga América Latina Logística (ALL). Atualmente a empresa opera 12 terminais de transbordo (tanto diretamente quanto em regime de parceria), com capacidade de armazenagem estática de aproximadamente 900 mil toneladas de grãos, açúcar e outras commodities

A Rumo é a maior operadora ferroviária do Brasil, oferecendo serviços logísticos de transporte por ferrovias, elevação em portos e estocagem de produtos. Atualmente, sua base de ativos é composta por quatro concessões, totalizando 12.021 km de linhas férreas, 1.000 locomotivas e 25.000 vagões, além de centros de distribuição e instalações de armazenamento.

2.3.4 MRS

A MRS é uma operadora logística que administra uma malha ferroviária de 1.643 km nos estados de Minas Gerais, Rio de Janeiro e São Paulo as principais cargas que transportamos estão: contêineres, siderúrgicos, cimento, bauxita, agrícolas, coque, carvão e minério de ferro. A companhia foi criada em 1996, quando o governo transferiu à iniciativa privada a gestão do sistema ferroviário nacional.

A malha ferroviária sob gestão da MRS estabelece conexão entre regiões produtoras, grandes centros de consumo e cinco dos maiores portos do país (nos municípios de Rio de Janeiro, Itaguaí, Sepetiba e Santos). São 1.643 km de ferrovia, que equivalem a aproximadamente 6% da estrutura nacional e nos quais são transportados cerca de um terço de toda a produção nacional.

2.4 Manutenção Ferroviária

Confiabilidade, isto é, pontualidade e segurança, são importantes aspectos inerentes ao transporte ferroviário. A qualidade estrutural de uma ferrovia influencia diretamente a confiabilidade do seu sistema ferroviário como um todo. Portanto, é importante que haja manutenção preventiva suficiente em seus componentes como dormentes, trilhos, lastro, talas de junção, entre outros (BUDAI et al, 2006).

Conforme conceituação da NBR 5462 – Confiabilidade e Manutenibilidade, manutenção é a combinação de todas as ações técnicas e administrativas, incluindo as de supervisão, destinadas a manter ou recolocar um item em um estado no qual possa desempenhar uma função requerida (ABNT, 1994). Dessa forma, a manutenção dos equipamentos e componentes de uma superestrutura ferroviária tem como objetivo manter a disponibilidade das ferrovias, diminuindo as interdições e restrições de velocidade.

As intervenções de manutenção ferroviária são divididas essencialmente em três operações singulares: manutenções preventivas, intervenções pontuais e renovações de via. Na primeira situação, é realizada a verificação dos componentes deterioráveis da via, seguida pela reparação e/ou eventual substituição daqueles que estiverem deteriorados. Já as intervenções pontuais são manutenções corretivas relacionadas à alguma falha de componente de via que comprometa a circulação de trens, como correções de fraturas de trilho, reparação de deformações geométricas, substituição de parafusos, etc. Por último, a renovação da via é o processo em que todos os elementos são substituídos devido à incapacidade de funcionamento da via ou para aumento da capacidade de transporte, considerando condições de circulação superiores às existentes.

De modo geral, a manutenção ferroviária é um processo de organização dos trabalhos de conservação da via permanente destinado a manter a superestrutura ferroviária em bom estado operacional. Segundo Ferreira (1996), com a robustez e o elevado investimento envolvidos no processo de manutenção, as ferrovias passaram a adotar estratégias de investimento em manutenção cada vez mais direcionadas aos problemas críticos identificados. Por outro lado, um equívoco no processo de manutenção ferroviária pode resultar em defeitos concentrados em pontos fracos que, caso não sejam devidamente identificados e reparados, podem criar deformações permanentes e irreversíveis na via, cuja solução demande a substituição integral dos componentes de todo o trecho ferroviário, com possíveis interrupções indesejadas na circulação de trens.

A escolha sobre o local que necessita de intervenção em manutenção normalmente é realizada em função da degradação dos componentes da via permanente que ocorrem, principalmente, devido às ações de fadiga e desgaste do material em conjunto a velocidade da circulação de trens no trecho, tipo de material do componente, geometria da via, condições geográficas, climáticas, etc.

2.4.1 Aperfeiçoamento dos Componentes de Via

Existem diversos estudos que visam melhorar a performance dos componentes de via, seja reduzindo ou otimizando a frequência de manutenção seja substituindo o conceito do componente. Em relação a otimização da frequência de manutenção dos dormentes, o estudo de Yun e Ferreira (2003) descreve um modelo de simulação para determinar a estratégia de substituição ideal do componente, dados os custos de substituição e benefícios resultantes do custo operacional da substituição. No caso do conceito, a madeira é o material mais utilizado nos dormentes ferroviários, no entanto, deteriora-se com o passar do tempo e necessita de substituição apropriada. Nos últimos anos, as madeiras utilizadas com essa finalidade têm se tornando mais caras, menos disponíveis e de qualidade inferior em relação à madeira anteriormente disponível. Existem ainda preocupações ambientais em relação ao uso e disposição de dormentes de madeira quimicamente impregnadas. Esses fatos resultaram na busca por materiais alternativos em substituição aos dormentes de madeira existentes. Manalo et al. (2010) apresentaram uma revisão dos materiais utilizados na confecção de dormentes

ferroviários até então e uma iniciativa centrada em compósitos de fibra como material alternativo.

Segundo Magalhães (2011b), para o correto desempenho na via, o dormente deve possuir as seguintes características:

- Suas dimensões, no comprimento e na largura, devem fornecer uma superfície de apoio suficiente para que a taxa de trabalho no lastro não ultrapasse os limites relativos a este material;
- Espessura com necessária rigidez, permitindo, entretanto, alguma elasticidade;
- Possuir suficiente resistência aos esforços solicitantes;
- Ter durabilidade;
- Permitir, com relativa facilidade, o nivelamento do lastro (socaria), na sua base;
- Opor-se, eficazmente, aos deslocamentos longitudinais e transversais da via;
- Permitir uma boa fixação do trilho, isto é, uma fixação firme, sem ser excessivamente rígida.

Magalhães (2011b) ressalta que, para o bom desempenho das funções, o material do lastro deve ter as seguintes características:

- Suficiente resistência aos esforços transmitidos;
- Possuir elasticidade limitada, para abrandar os choques;
- Ter dimensões que permitam sua interposição entre os dormentes e o sublastro;
- Ser resistente aos agentes atmosféricos;
- Ser material não absorvente, não poroso e de grãos impermeáveis;
- Não deve produzir pó (o pó afeta o material rodante e causa mal-estar aos passageiros).

2.4.2 Melhoria nos processos de manutenção ferroviária

Antes que as equipes de manutenção da via férrea possam realizar qualquer trabalho, a alocação de atividades e recursos em intervalos de tempo disponíveis em escalas de trens devem ser realizadas. Existem metodologias e modelos disponíveis na literatura de forma a otimizar tais alocações. Higgins (1998) apresentou um modelo destinado a

determinar a melhor alocação de atividades de manutenção e equipes de manutenção de forma a minimizar a interrupção de trens agendados e reduzir o tempo de conclusão dessas atividades sujeito a restrições, como orçamento disponível, precedência de atividade de manutenção, disponibilidade de intervalos de manutenção e tempo mínimo de viagem entre os pátios de desvios de trens. A solução do modelo, que utilizou heurística de pesquisa, foi encontrada trocando a ordem de trabalhos, equipes de manutenção ou ambos e alcançou uma redução de 8% nos atrasos da programação de trens e redução de 7% nos tempos médios de conclusão das atividades, em relação a soluções construídas manualmente quando aplicados em um corredor de 300 km de extensão com um horizonte de planejamento de quatro dias.

Para reduzir custos e inconvenientes relacionados a colapsos inesperados em sistemas ferroviários, Budai et al (2006) apresentaram uma formulação matemática voltada para programação de serviços com objetivo de minimizar custos de manutenção e reduzir os tempos inevitáveis de interdição de via associados às atividades necessárias de manutenção como reparos e, principalmente, substituições de componentes.

Dada a importância da redução dos intervalos de manutenção, principalmente aqueles que necessitem de interrupção do fluxo de trens, Borraz-Sanchez e Klabjan (2012) abordaram o problema de programação de manutenção de trilhos ferroviários, atividade esta que necessita de interrupção da via férrea. Foi proposta uma abordagem de solução eficiente de forma a minimizar custos totais envolvidos nas atividades de substituição de trilhos e otimização de mão de obra considerando alocações de recursos humanos (equipes de manutenção), bem como logística efetiva para o movimento e roteamento de equipamento necessários à atividade em torno da rede ferroviária sob as restrições da janela de tempo. O objetivo foi alcançado através de um processo iterativo que extrai e posteriormente reinsere trabalhos com base em um modelo de programação de números inteiros.

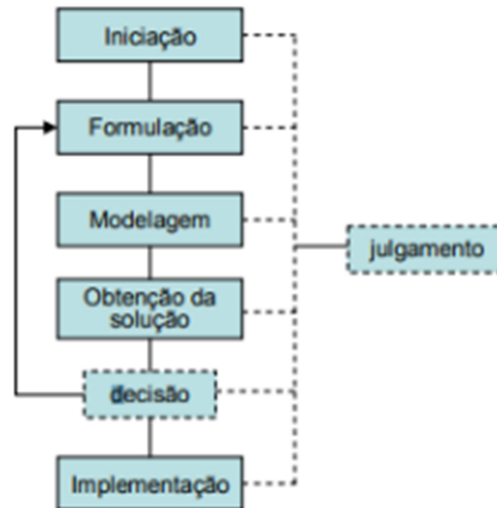
3 PROGRAMAÇÃO POR METAS

Gomes (2006) define decisão como um processo que leva, direta ou indiretamente, à escolha de ao menos uma dentre diferentes alternativas candidatas a resolver determinado problema. Segundo Uliana (2010), cada vez mais os tomadores de decisão consideram uma grande variedade de critérios na avaliação de diferentes alternativas que lhe são oferecidas, como por exemplo, atender às necessidades dos consumidores, maximizar o lucro, atender aos deveres e responsabilidades com a sociedade, melhorar treinamento de pessoal, atender aos interesses de acionistas, melhorar a qualidade de produtos, atingir o progresso tecnológico, maximizar crescimento da empresa, melhorar a eficiência gerencial, atender aos deveres com governo e melhorar relações com fornecedores. Nesse contexto, os modelos de otimização são construídos para tomadas de decisões variando amplamente em seu grau de objetividade e dependência de dados e no formato de seus resultados (AHERN & ANANDARAJAH, 2007).

Tendo em vista a complexidade das organizações atuais, os tomadores de decisão buscam maximizar funções execução em geral não muito bem definidas. Conflitos de interesses e falta de informações completas dificultam a construção de uma função matemática confiável que represente as do decisor. Então, considerando a ausência de um ambiente de decisão ideal, o tomador de decisão busca e alcança uma série de metas (ou alvos) com a maior proximidade possível da solução desejada (TAMIZ et al, 1998).

A principal meta da tomada de decisão é auxiliar o decisor a articular suas preferências em presença de ambiguidades, conflitos e incertezas, tornando a decisão mais coerente conforme seus interesses (MARANHÃO, 2006). Morais Neto (1988) resumiu o processo de tomada de decisão em cinco passos, descritos na sequência e ilustrados na Figura 6:

Figura 6 – O processo de Tomada de Decisão



Fonte: Morais Neto (1988).

- Iniciação: quando o decisor, percebendo a necessidade de alteração, realiza um diagnóstico do sistema;
- Formulação: envolve várias tarefas como a definição do problema, especificação dos objetivos e identificação das medidas dos atributos;
- Modelagem: uma vez que o sistema, seu ambiente e o conjunto de objetivos estão bem definidos, um modelo é construído. Esse modelo deve representar o mais fielmente possível o sistema;
- Obtenção da solução: através de métodos e técnicas apropriadas de tomada de decisão, todas as alternativas viáveis são analisadas com a finalidade de se obter uma solução para o problema;
- Implementação: se a solução encontrada for considerada satisfatória, será então implementada. Caso contrário os resultados obtidos serão analisados e deve-se retornar ao passo Formulação para as correções necessárias.

Dentre os vários métodos de tomada de decisão com objetivos múltiplos, a Programação por Metas, ou *Goal Programming* (GP), é considerada por Aouni e Kettani (2001) o modelo mais conhecido de programação multicritério e que apresenta crescente utilização, tendo em vista a ampla rede de pesquisadores e usuários

continuamente evoluindo em seu desenvolvimento teórico e em suas aplicações, todas com elevado grau de sucesso.

A Programação por Metas foi proposta por Charnes & Cooper (1961) com a tarefa de resolver modelos matemáticos de otimização com restrições flexíveis e múltiplos objetivos. Dessa forma, a GP é uma extensão da programação linear em que uma ou mais metas são formuladas como restrições e as funções objetivo buscam minimizar a soma dos desvios absolutos dessas metas.

Morais Neto (1988) explica que a formulação da Programação por Metas visa encontrar $x = (x_1, x_2, \dots, x_j)$ que minimize a função execução:

$$a = \{ f_1(\eta_i, \rho_i), f_2(\eta_i, \rho_i), \dots, f_i(\eta_i, \rho_i) \}$$

e tal que:

$$\sum_{j=1}^J c_{ij} x_j + \eta_i - \rho_i \equiv b_i$$

para todo i, j

com:

$$x_j, \eta_i, \rho_i \geq 0$$

Onde:

$$i = 1, 2, \dots, I;$$

$$j = 1, 2, \dots, J;$$

$f_i(\eta_i, \rho_i)$: função linear das variáveis de desvio na prioridade i ;

x_j : variável de decisão j ;

η_i, ρ_i : variáveis de desvio negativo e positivo da meta i ;

c_{ij} : coeficiente da variável de decisão x_j na meta i ;

b_i : nível de aspiração da meta i .

Na formulação típica de programação linear com objetivos múltiplos, as três formas básicas de metas apresentadas são transformadas, adicionando a variável de desvio

negativo (η) e subtraindo a variável de desvio positivo (ρ). Essas variáveis de desvio são, por definição, positivas ($\eta_i \geq 0$, $\rho_i \geq 0$) e a existência de uma implica a anulação da outra, ou seja, se $\eta_i \geq 0$, então $\rho_i = 0$, e vice-versa. Isto é assegurado pela exigência de que $\eta_i \cdot \rho_i = 0$. O Quadro 2 mostra essas transformações.

Quadro 2 – Transformação de objetivos em metas

Metas Básicas	Formulação em Programação Linear por Objetivos Múltiplos	Minimizar
$f_i(x) \leq b_i$	$f_i(x) + \eta_i - \rho_i = b_i$	ρ_i
$f_i(x) \geq b_i$	$f_i(x) + \eta_i - \rho_i = b_i$	η_i
$f_i(x) = b_i$	$f_i(x) + \eta_i - \rho_i = b_i$	$\eta_i + \rho_i$

Fonte: Morais Neto (1988).

Deve-se observar que as transformações acima são aplicáveis não apenas aos objetivos, mas também às restrições, caso houver.

De modo geral, os modelos determinísticos da Pesquisa Operacional (PO) assumem que os dados coletados sejam confiáveis, mesmo que se tratem de informações que possam apresentar incertezas inerentes à sua natureza, como, por exemplo: custos de matéria-prima e previsões de demanda ou de vendas. Nesses modelos, como uma simplificação, considera-se que a informação necessária para análise se mantenha próxima aos valores obtidos na coleta de dados, no período em que será tomada a decisão, a partir dos resultados do modelo (SEN & HIGLE, 1999).

3.1 Terminologia

Dentre os diversos termos utilizados nos problemas de otimização de objetivos múltiplos, as definições básicas introduzidas por Jones e Tamiz (2010) são apresentadas a seguir e serão consideradas para o desenvolvimento do trabalho. Vale ressaltar que a adaptação aos termos originais foi realizada de forma livre pelo autor deste:

1. Tomador(es) de decisão: pessoa, organização ou parte interessada responsável por tomar decisões em relação a determinado problema;

2. Variável de decisão: trata-se de um fator sobre o qual o tomador de decisão tem controle. Um exemplo seria a definição da quantidade de certo produto que deveria ser fabricada por determinada empresa no próximo mês. O conjunto de variáveis de decisão descreve de forma completa o problema e constrói a decisão a ser tomada. O modelo de Programação por Metas pode ser definido como a busca por todas as combinações de valores das variáveis de decisão possíveis (conhecido como *decision space*) de modo a determinar o ponto que melhor satisfaz os objetivos e restrições do tomador de decisão.
3. Critério: um critério é uma medida simples pela qual a efetividade de qualquer solução para determinado problema pode ser medida. Dentre as diversas possibilidades de critérios existentes destacam-se:
 - Custo
 - Lucro
 - Tempo
 - Distância
 - Desempenho de um sistema
 - Estratégia organizacional
 - Preferencias pessoais do tomador de decisão
 - Considerações de segurança.

Um problema que possua mais de um critério é classificado como um problema de tomada de decisão por múltiplos critérios.

4. Objetivo: trata-se do critério, porém com uma informação adicional da direção (maximizar ou minimizar) para qual o tomador de decisão deseja seguir, como por exemplo, minimizar custos ou maximizar o desempenho de um sistema. Um problema de decisão, com um conjunto de objetivos a serem maximizados ou minimizados é classificado como um problema de otimização de múltiplos objetivos. Na prática, esses objetivos serão conflitantes, a partir do momento em que os mesmos não puderem obter seus valores ótimos simultaneamente. O espaço formado pelos valores do conjunto de objetivos é definido como *objective space*, representado na figura abaixo, para um problema com dois objetivos.

5. Meta: uma meta se refere a um critério e a um nível numérico, conhecido como *target level*, o qual o tomador de decisão deseja atingir naquele critério. Existem três principais tipos de metas que podem ocorrer em um modelo de Programação por Metas: atingir ao máximo o alvo, atingir pelo menos o alvo e atingir exatamente o alvo.
6. Variável de desvio: uma variável de desvio mede a diferença entre o *target level* de um determinado critério e o valor possível de se alcançar em uma solução encontrada. Se o valor alcançado estiver acima do *target level*, a diferença será definida como a variável de desvio positiva. Caso o valor atingido seja menor que o *target level*, então essa diferença será a variável de desvio negativa.
7. Limitação: uma limitação é uma restrição imposta sobre as variáveis de decisão, que deve ser satisfeita de modo que a solução seja implementável na prática. Uma limitação em geral é uma função de diversas variáveis de decisão e pode ser uma igualdade ou uma desigualdade.

3.2 Variações da Programação por Metas

A Programação por Metas evoluiu com o decorrer do tempo e passou a apresentar diversas variações, tendo como principais enfoques determinísticos, segundo verificação realizada por Silva e Marins (2015):

- Programação por Metas Ponderada (*Weighted Goal Programming – WGP*): foi a primeira proposta desenvolvida, em que se atribuem pesos para as variáveis de desvios (para mais ou para menos) com relação às metas estabelecidas para os objetivos;
- Programação por Metas Lexicográfica ou com Priorização (*Lexicographic Goal Programming – LGP*): também conhecida por *Preemptive Goal Programming*, nela os objetivos são ordenados de acordo com sua importância, a partir de uma priorização (hierarquização) feita pelos decisores a priori;
- Programação por Metas Minmax (*Minmax Goal Programming – Minmax GP*): aqui se trabalha com as funções de realização que consideram a soma das variáveis desvio;

- Programação por Metas Estendida (*Extended Goal Programming – EGP*): é uma combinação convexa da WGP, da LGP e da Minmax GP;
- Programação por Metas Inteira (*Integer Goal Programming – IGP*): há a atribuição de funções de penalidade;
- Programação por Metas Binária (*Binary Goal Programming – BGP*): há variáveis inteiras binárias associadas à realização ou não das metas estabelecidas para os objetivos;
- Programação por Metas e Análise por Envoltória de Dados (*Goal Programming and Data Envelopment Analysis – GPDEA*): desenvolvida para, nas aplicações da DEA, melhorar a discriminação de Unidades Tomadoras de Decisão (*Decision Making Units – DMUs*), quando o número de DMUs é inferior ao número total de variáveis de entrada e saída do modelo.

Dentre os modelos de Programação por Metas existentes, de acordo com a pesquisa de Silva e Marins (2015), os três tipos de modelos de PM determinísticas mais utilizados por pesquisadores (desenvolvimentos teóricos) e tomadores de decisão (aplicações reais) são: ponderada, lexicográfica e minmax, melhor detalhadas a seguir.

- PM Ponderada:

O desejo do decisor em relação aos desvios positivos ou negativos será diferente, de acordo com a importância relativa do objetivo, e no modelo de PM pode ser expressa pelos pesos w_i^+ e w_i^- respectivamente. A representação matemática da PM ponderada será conforme abaixo (AOUNI et al, 2014):

$$\text{Min } a = \sum_{q=1}^Q (w_i^+ p + w_i^- n)$$

Sujeito a:

$$f_q(x) + n_q - p_q = b_q \quad q = 1, \dots, Q$$

$$x \in F$$

$$nq, pq \geq 0 \quad q = 1, \dots, Q$$

- PM Lexicográfica:

Segundo Aouni et al (2014), a PM Lexicográfica, por vezes nomeada como PM de preferência, é baseada na otimização dos objetivos de acordo com suas importâncias relativas para o decisor. Os objetivos mais importantes estarão no maior nível de prioridade, enquanto os menos importantes estarão nos menores níveis. Os valores de desvio obtidos de um alto nível de prioridade serão considerados restrições quando relacionados com menores níveis de prioridade. Ou seja, os objetivos de menores níveis de prioridade terão um papel secundário no processo decisório.

Para a formulação algébrica da PM Lexicográfica genérica, Tamiz e Jones (2010) definem o número de níveis de prioridade como L , com o índice de correspondência $l = 1, \dots, L$. Cada nível de prioridade é uma função de um conjunto de variáveis de desvio indesejadas, definidas como $h_l(n, p)$, o que leva à seguinte formulação:

$$\text{Lex Min } a = [h_1(n, p), h_2(n, p), \dots, h_L(n, p)]$$

Sujeito a:

$$f_q(x) + nq - pq = bq \quad q = 1, \dots, Q$$

$$x \in F$$

$$nq, pq \geq 0 \quad q = 1, \dots, Q$$

- PM Minmax:

No Minmax, os gestores, frente à dificuldade de se estabelecer um valor de meta para cada objetivo, preferem identificar intervalos onde esses objetivos possam variar entre valores mínimos e valores máximos. O método procura, dependendo do tipo de objetivo envolvido, minimizar o limitante superior (ou o valor máximo, como no caso de um objetivo envolvendo custos) ou maximizar o limitante inferior (ou o valor mínimo, como

no caso de um objetivo envolvendo lucros) do intervalo identificado pelo gestor. A formulação geral do modelo, segundo Romero (2004), pode ser expressa por:

$$(\alpha_i d_i^- + \beta_i d_i^+) - D \leq 0$$

Sujeito a:

$$f_q(x) + n_q - p_q = b_q \quad q = 1, \dots, Q$$

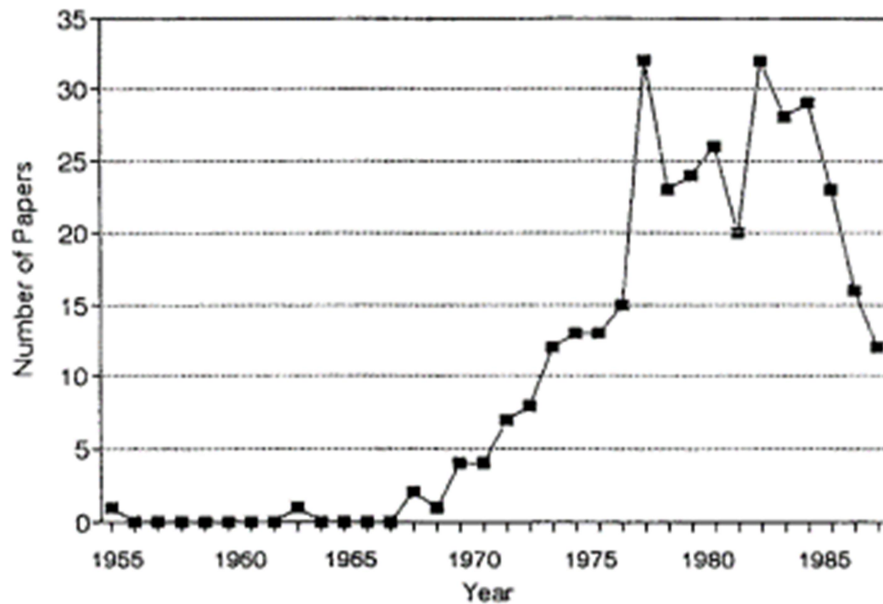
$$x \in F$$

$$n_q, p_q \geq 0 \quad q = 1, \dots, Q$$

3.3 Aplicações da Programação por Metas

O método da Programação por Metas foi definido por Charnes et al. em 1961, alguns anos após ter sido introduzida pelos mesmos autores em 1955, tendo seus primeiros livros dedicados na primeira metade da década de 1970 e sua popularidade aumentada na sequência, conforme observado no aumento da quantidade de artigos publicados sobre o assunto demonstrado no gráfico da Figura 7 (TAMIZ; JONES; EL-DARZI, 1995).

Figura 7 – Publicações em PM entre os anos de 1955 e 1987



Fonte: Tamiz; Jonez; El-Darzi (1995).

Com o aumento da popularização, o método passou, então, a ser utilizado em aplicações práticas. Segundo Schniederjans (1995), nos mais de 980 artigos analisados sobre a metodologia, 666 eram sobre modelos aplicados ou estudos de caso. O autor cita aplicações da Programação por Metas nas seguintes áreas: administração, agricultura, contabilidade, economia, engenharia, finanças, publicidade, questões governamentais e internacionais.

Além das áreas descritas anteriormente, é possível destacar as publicações e pesquisas baseadas em Programação por Metas voltadas para o setor de Transportes. Uliana e Morais Neto (2009) adaptaram a pesquisa de Jones (2004) e constataram que, no período entre 1990 e 2000, 12,8% das aplicações da Programação por Metas publicadas em periódicos de referência eram relacionados à área de transportes e distribuição. A Tabela 1 apresenta a distribuição dos campos de aplicação em transportes publicados no período.

Tabela 1 – Aplicações da PM em Transportes entre 1990 e 2000

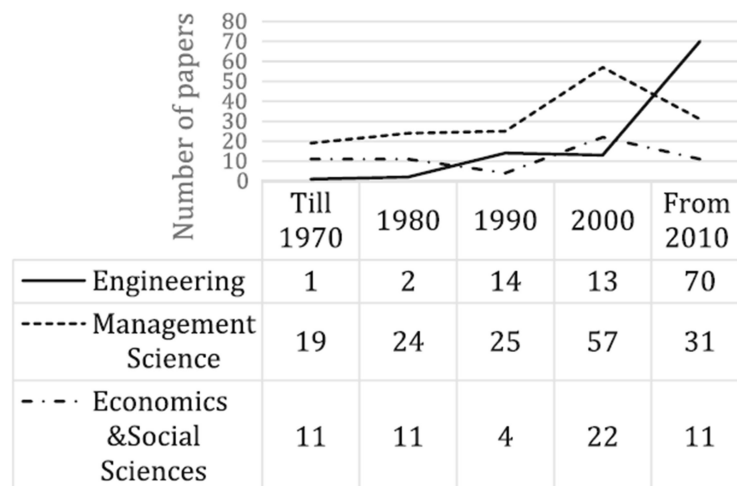
Campo de Aplicação	Artigos em Transportes	%
Transportes e distribuição	11	4,2%
Planejamento e produção energética	6	2,3%

Campo de Aplicação	Artigos em Transportes	%
Planejamento da produção	6	2,3%
Gerenciamento de recursos naturais	3	1,1%
Planejamento da demanda de suprimentos	2	0,8%
Gestão ambiental e de resíduos	2	0,8%
Gerenciamento agrícola	1	0,4%
Engenharias	1	0,4%
Planejamento estratégico e gerencial	1	0,4%
Planejamento socioeconômico	1	0,4%
Total	34	12,8%

Fonte: Uliana e Morais Neto (2009).

A PM se tornou um dos métodos de otimização de múltiplos objetivos mais utilizados e, dentre as referências pesquisadas, Colapinto et al (2015) apresentaram a revisão mais atualizada publicada até então. A Figura 8 apresenta a quantidade de artigos considerados nessa revisão por campo de aplicação da PM, onde destaca-se o aumento substancial nas pesquisas em engenharia a partir dos anos 2000.

Figura 8 – Evolução da aplicação da PM por disciplina



Fonte: Colapinto et al (2015).

Daher (2017) apresentou uma síntese de sua revisão bibliográfica com aplicações da Programação por Metas dentre outras metodologias de otimização com múltiplos

objetivos, destacando a área de atuação e a metodologia utilizada. O resultado está apresentado no Quadro 3.

Quadro 3 – Estratificação de pesquisas por metodologia e área de aplicação

Autores	Ano	Área de aplicação				Metodologia				
		Transportes	Seleção Projetos	Revisão POM	Outra	PM Lexicográfica	PM Ponderada	PM Fuzzy	PM inteira/binária	Outra
Ahern et al.	2006	●	●							●
Ahern et al.	2007	●	●				●			
Ahern et al.	2008	●	●							●
Aouni et al.	2001			●						
Aouni et al.	2014		●	●						
Avineri et al.	2000	●	●							●
Badri et al.	2001		●						●	
Chang et al.	2009	●	●						●	
Colapinto et al.	2015			●						
Hassan et al.	2012				●					●
Huang	2007		●							●
Jones et al.	1995			●						
Kahraman et al.	2008		●					●		
Kocadagli et al.	2015		●					●		
Kwak et al.	1998				●				●	
Lang	2007	●	●							●
Liang	2010				●			●		
Mezher et al.	1998				●		●			
Mohajeri et al.	2010	●								●
Morais Neto	1988	●				●				
Mukherjee et al.	1995		●				●			
Niemeier et al.	1995	●	●						●	●
Perez et al.	2015			●						
Petersen et al.	2001	●	●							●
Ramos et al.	2014				●				●	
Tamiz et al.	1998			●						
Teng et al.	1996	●	●							●
Teng et al.	1998	●	●					●	●	
Tsamboulas	2007	●	●							●
Uliana	2010	●					●			
Wey et al.	2007	●	●						●	
Yang et al.	2011	●					●			
Total		16	18	6	5	1	5	4	7	11
Percentual		50%	56%	19%	16%	3%	16%	13%	22%	34%

Fonte: Daher (2017).

Dentre as referências apresentadas no Quadro 3, merecem destaque as metodologias que apresentaram aplicação na área de transportes.

Niemeier et al (1995) desenvolveram cinco modelos de otimização para a seleção de um conjunto de projetos com o objetivo de aprimorar a performance de todo um sistema de transportes hipotético. Cada modelo pode ser utilizado de acordo com a necessidade do especialista em transportes que estiver utilizando a ferramenta desenvolvida. Dentre os modelos, um utilizou a PM ponderada, demonstrando uma melhor performance e apresentando resultados muito mais próximos às expectativas do decisor, de acordo com todos os objetivos.

Teng et al (1996) desenvolveram um método de seleção de alternativas independentes de investimentos em transportes, através de um algoritmo de heurística da distância eficaz, buscando maximizar os objetivos alcançados, de acordo com os recursos disponíveis. Eles formularam como um problema *Knapsack 0-1* de múltiplos objetivos multidimensional.

Alguns autores consideraram que os métodos usuais para priorização de projetos de investimentos em transportes não são capazes de lidar de forma efetiva com as preferências e incertezas dos tomadores de decisão e por isso propuseram a utilização da teoria *fuzzy set*, capaz de lidar com informações não precisas.

Teng et al (1998) aplicaram essa teoria e propuseram um modelo de PM 0-1 *fuzzy*, que foi aplicado em uma situação hipotética para seleção de projetos de investimentos em transportes, considerando 10 projetos, com restrições de recursos e objetivos a serem atingidos, sendo esses qualitativos e quantitativos. Eles utilizaram a ideia da eficiência do *objective space* e do *resource space* para detectar o índice *fuzzy* de todos os projetos de investimentos, assim como para os critérios de seleção. AVINERI ET AL. (2000) também aplicaram a teoria *fuzzy set* na seleção de projetos de rodovias interurbanas em Israel, porém sem a utilização da PM. Huang (2007) também utilizou a lógica *fuzzy* para desenvolver um algoritmo híbrido inteligente, integrando algoritmo genético e simulação *fuzzy* aleatória, para aplicação no ambiente de seleção de projetos de investimentos genéricos.

Wey et al. (2007) propuseram uma metodologia para seleção de projetos de infraestrutura de transportes, combinando o método *fuzzy Delphi*, com ANP e com a PM 0-1. Eles aplicaram o modelo a um estudo de melhoria de infraestrutura de transportes na cidade de Taichung, em Taiwan e concluíram que a aplicação da ANP é fundamental para possibilitar uma abordagem sistemática para a definição de prioridades em modelos de múltiplos objetivos.

No Brasil, a metodologia da Programação por Metas também tem sido explorada pela área de transportes que tem apresentado publicações com certa periodicidade e aplicações distintas.

Morais Neto (1988) desenvolveu procedimentos voltados para alocação de fluxos de cargas militares empregando métodos de tomada de decisão com objetivos múltiplos. Para tanto, utilizou da decomposição de objetivos e do método da utilidade associada para o estabelecimento das metas a partir dos objetivos formulados sobre disponibilidade de tempo, limitação de recursos financeiros e suprimento das demandas existentes.

Ramos (1995), por sua vez, definiu procedimento para decidir alternativas a serem tomadas em terminais marítimos petroleiros para melhorar seu desempenho operacional. Durante a análise do problema utilizou a teoria das filas e um modelo de simulação para o tratamento das variáveis e os objetivos foram baseados em volume de cargas operado, custo dos terminais, investimento necessário e risco de vazamentos.

Cunha e Caixeta Filho (2002) desenvolveram metodologia para auxiliar tomada de decisões nos níveis tático e operacional do gerenciamento de resíduos urbanos e aplicaram no município de Piracicaba, SP. Na formulação do modelo, definiram sete metas para o modelo proposto, entre elas: maximizar quantidades de resíduos a serem recolhidos (demanda), minimizar quilometragem de percurso dos caminhões coletores, minimizar despesas de coleta, etc.

Uliana (2010) aplicou a programação de metas de forma a auxiliar a tomada de decisão na distribuição de gás natural por meio de modelo proposto e aplicação em estudo de caso no município de Linhares, ES. Os objetivos propostos foram atender a demanda de gás natural, assegurar valor presente líquido nulo no fluxo de caixa relacionado aos

investimentos em distribuição de gás e não ultrapassar os limites superior e inferior estabelecidos para a tarifa.

Daher (2017) adotou os critérios disponibilidade de recursos financeiros, avaliação de valor presente líquido, tempo de retorno e sustentabilidade como objetivos como forma de priorização de projetos de investimentos em ferrovia.

3.4 Método da Utilidade Associada

De acordo com Uliana (2010), os métodos baseados na Teoria da Utilidade são empregados quando se tem um conjunto explicitamente bem definido de alternativas a serem avaliadas.

O grande mérito da Teoria da Utilidade é que sua aplicação é possível não apenas em análises de decisões que envolvam resultados quantitativos, mas também qualitativos. A quantificação é realizada pela associação de um valor abstrato de utilidade para cada uma das situações possíveis. Portanto, um evento que não tem correspondente numérico ou monetário pode ser transformado em valores de utilidade (MARGUERON, 2003).

Uma situação fictícia de seleção de alternativas de aplicação de materiais de via é proposta na Tabela 2 localizada abaixo, onde são apresentados os atributos × os projetos a serem priorizados, com o intuito de esclarecer o método da utilidade associada, a partir da Teoria da Utilidade.

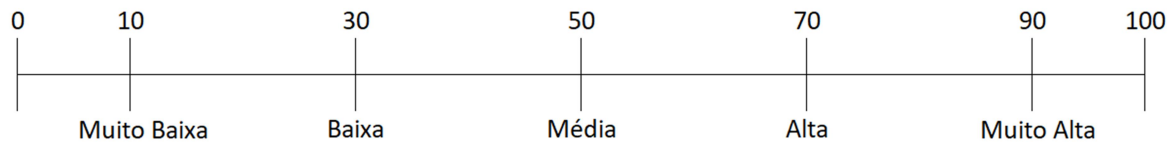
Tabela 2 – Exemplo de atributos de alternativas de aplicação de materiais

Atributo	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
Investimento (10 ³ R\$)	1.000	2.000	500
Aplicação de dormentes (un)	20.000	40.000	10.000
Aplicação de lastro (m ³)	400	800	200
Melhoria operacional	médio	alto	Baixo

Enquanto os três primeiros atributos são expressos quantitativamente por diferentes tipos de medida, o atributo impacto nas comunidades é expresso qualitativamente.

Uma das maneiras de lidar com aspectos qualitativos é fazer o uso de uma escala ordinal única (Figura 9), na qual o decisor é chamado a avaliar cada um dos atributos (MORAIS NETO, 1988).

Figura 9 – Escala numérica para medir objetivos quantitativos



Fonte: Moraes Filho.

A partir da utilização dessa escala, os atributos do exemplo acima podem ser expressos em forma numérica dentro de uma mesma escala, como pode ser conferido na Tabela 3:

Tabela 3 – Atributos em uma mesma escala

Atributos	Peso	Alt. 1	Alt. 2	Alt. 3
Aplicação de dormentes (un)	0,30	40	80	20
Substituição de trilho (m)	0,20	60	72	30
Aplicação de lastro (m ³)	0,40	40	80	20
Melhoria operacional	0,10	30	70	50

No intuito de se calcular a utilidade total de cada alternativa, dá-se pesos a cada um dos atributos, uma vez que todos estes são importantes para o processo de tomada de decisão, de forma a quantificar a importância dos mesmos.

A partir da classificação da utilidade e pesos de cada atributo, é possível calcular a utilidade total de cada alternativa, sendo essas:

$$U_1 = (0,30 \times 40) + (0,20 \times 65) + (0,40 \times 40) + (0,10 \times 30) = 50$$

$$U_2 = (0,30 \times 80) + (0,20 \times 70) + (0,40 \times 80) + (0,10 \times 70) = 77$$

$$U_3 = (0,30 \times 20) + (0,20 \times 30) + (0,40 \times 20) + (0,10 \times 50) = 25$$

Sendo assim, os projetos podem ser ordenados de acordo com suas utilidades totais, sendo que para o exemplo apresentado Alternativa 2 seria prioritário em relação à Alternativa 1, que por sua vez seria prioritário em relação à Alternativa 3.

Dessa forma, o cálculo das utilidades totais de cada alternativa pode ser expresso na seguinte forma algébrica:

$$U_i = \sum_{j=1}^J w_j u_{ij}$$

Onde:

J = número de atributos;

I = número de alternativas;

w_j = peso associado ao atributo j;

u_{ij} = utilidade do atributo j na alternativa i;

U_i = utilidade total da alternativa i.

Vale ressaltar que a utilidade é um valor abstrato que serve para quantificar o quão desejável é cada uma das ocorrências para determinada pessoa. Portanto, é flagrante o elevado grau de subjetividade envolvido na definição das funções-utilidade. E, por esta razão, elas são absolutamente específicas para determinada pessoa em determinada situação, não podendo jamais serem extrapoladas para outro decisor ou outro cenário (MARGUERON, 2003).

4 O MODELO PROPOSTO

Ao longo do desenvolvimento do trabalho, serão determinadas todas as variáveis que farão parte do problema. De qualquer forma, para a manutenção da superestrutura ferroviária, serão levadas em conta as seguintes:

- Recursos disponíveis;
- Força de trabalho disponível;
- Sequências de dormentes inservíveis;
- Extensão de lastro ferroviário deficiente;
- Extensão de trilhos fora dos limites de tolerância;
- Fator de risco associado.

Enquanto os cinco primeiros atributos são expressos quantitativamente por diferentes tipos de medida, o atributo fator de risco associado é expresso qualitativamente.

Entende-se por fator de risco associado uma medida a partir do método da utilidade associada que considera os seguintes itens:

- Aspecto geométrico da via (inclinação, raio da curva);
- Fatores geográficos (área rural, perímetro urbano, etc);
- Fatores ambientais (área de preservação ambiental, cursos d'água, etc);

4.1 Metodologia

O estudo leva em conta o desenvolvimento de uma ferramenta de priorização da substituição de componentes danificados em uma ferrovia utilizando a Programação por Metas. Para tanto, a metodologia deve considerar os seguintes itens:

- Definição dos objetivos;
- Transformação dos objetivos em metas;
- Priorização das metas;
- Formulação da função execução.

4.2 Definição dos Objetivos

Objetivo é uma expressão que reflete a vontade do decisor acerca de um determinado estado do sistema em questão. É uma expressão que exprime a vontade do decisor e, assim, pode ou não ser plenamente alcançada (MORAIS NETO, 1988).

A existência de múltiplos objetivos requer atenção especial na mensuração de cada um deles, uma vez que nem todos podem ser medidos ou relacionados a algum atributo. A definição dos objetivos se dá a partir de um objetivo geral, que por sua vez é desmembrado em objetivos específicos, até que cada um destes possa ser medido através de algum atributo.

Para o presente estudo, o seguinte objetivo geral é proposto:

1. Priorizar a manutenção da superestrutura ferroviária conforme recursos disponíveis, força de trabalho existente e indicadores operacionais.

O objetivo geral é decomposto nos seguintes objetivos específicos (segundo nível):

- 1.1. Não ultrapassar o limite de recursos financeiros disponíveis para manutenção;
- 1.2. Não exceder a capacidade de trabalho disponível para as atividades de manutenção;
- 1.3. Reduzir a condição de risco existente associada aos defeitos de via presentes;
- 1.4. Melhorar a condição atual da via conforme critérios de manutenção.

Dessa forma, alguns atributos podem ser associados em conjunto com as respectivas unidades de medida em alguns desses objetivos específicos, conforme Quadro 4 abaixo:

Quadro 4 – Objetivos específicos do segundo nível

ID	Objetivo	Atributo	Unidade
1.1	Não exceder o limite de recursos financeiros disponíveis para manutenção da via	Recursos	R\$
1.2	Atender a capacidade de trabalho disponível para as atividades de manutenção	Mão de obra	Dias
1.3	Reduzir a condição de risco existente associada aos defeitos de via presentes	Índice de risco	Ur
1.4	Melhorar a condição atual da via conforme critérios de	-	-

ID	Objetivo	Atributo	Unidade
	manutenção		

O objetivo 1.3 não possui unidade que descreva o risco associado à região ou local onde o defeito se encontra por se tratar de um objetivo qualitativo, sendo necessária a utilização do Método da Utilidade Associada para uma melhor descrição em termos de uma escala numérica. Dessa forma, os seguintes fatores ambientais, demográficos e geométricos são considerados:

- Proximidade com cursos d'água ou áreas de preservação ambiental;
- Proximidade com centros urbanos ou povoados;
- Geometria da via (reta ou curva).

Já o objetivo 1.4, descrito de forma genérica, necessita de um maior detalhamento para que possa ter uma forma de mensuração. Sendo assim, este item é decomposto em objetivos mais específicos (terceiro nível), conforme Quadro 5:

Quadro 5 – Objetivos específicos do terceiro nível

ID	Objetivo	Atributo	Unidade
1.4.1	Substituir dormentes inservíveis	Dormente	Und
1.4.2	Substituir trilhos abaixo da tolerância	Trilho	M
1.4.3	Aplicar lastro em locais com insuficiência	Lastro	M

4.3 Estimativa do Índice de Risco

A estimativa do índice de risco considera uma combinação entre a medida e a criticidade dos defeitos existentes (dormentes, lastro e trilhos) relacionadas à gravidade envolvendo a localização desses defeitos. A equação para a estimativa do índice de risco, medido em unidades de risco, é representada a seguir:

$$R_i = \sum_{m=1}^M (u_m \cdot \delta_{im}) \sum_{n=1}^N (g_n \cdot \lambda_{in})$$

Onde:

i : cada trecho ou divisão da ferrovia em l partes iguais ($i = 1, 2, 3, \dots, l$);

m : tipo de defeito analisado: dormente ($m = 1$), lastro ($m = 2$), trilho ($m = 3$);

n : critério referente à localidade do defeito: demográfico ($n = 1$), ambiental ($n = 2$), geométrico ($n = 3$);

u_m : fator de ponderação referente à criticidade ou urgência do defeito m ;

g_n : peso referente a gravidade de cada um dos n critérios de avaliação da localidade;

δ_{im} : medida ou extensão do defeito m no trecho i ;

λ_{in} : fator de ponderação referente à gravidade da localidade referente ao critério n no trecho i .

O Método da Utilidade Associada, conforme apresentado por Morais Neto (1988), atribui um valor numérico a um atributo incomensurável ou qualitativo. Dessa forma, o valor do fator de gravidade associado à localidade λ_{in} é representado pela escala numérica descrita na Figura 10, conforme avaliação do decisor.

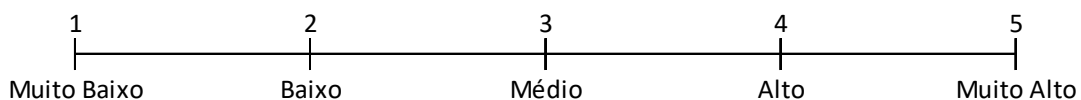


Figura 10 – Escala numérica para o fator de gravidade do local do defeito

4.4 Transformação dos Objetivos em Metas

Uma vez que os objetivos são definidos, os mesmos devem ser transformados em metas. A meta é obtida pela inclusão dos desvios negativos (inferiores a meta) e positivos (superiores a meta) na expressão matemática que representa o objetivo e, ainda, pela atribuição do seu alvo ou nível de atingimento. Para o problema em questão, são formuladas as seguintes metas:

- a) Meta de Custo

$$\sum_{i=1}^I (x_i \cdot C_i) + \eta_1 - \rho_1 = M_1$$

b) Meta de Mão de Obra

$$\sum_{i=1}^I (x_i \cdot W_i) + \eta_2 - \rho_2 = M_2$$

c) Meta de Redução do Risco

$$\sum_{i=1}^I (x_i \cdot R_i) + \eta_3 - \rho_3 = M_3$$

d) Meta de Substituição de Dormentes

$$\sum_{i=1}^I (x_i \cdot S_i) + \eta_4 - \rho_4 = M_4$$

e) Meta de Aplicação de Lastro

$$\sum_{i=1}^I (x_i \cdot B_i) + \eta_5 - \rho_5 = M_5$$

f) Meta de Substituição de Trilhos

$$\sum_{i=1}^I (x_i \cdot T_i) + \eta_6 - \rho_6 = M_6$$

Onde:

i: cada trecho ou divisão da ferrovia em I partes iguais ($i = 1, 2, 3, \dots, I$);

j: identificação numérica de cada uma das J metas ($j = 1, 2, 3, \dots, J$);

η_j e ρ_j : variáveis de desvio para baixo e para cima da meta j;

M_j : valores alvo para cada meta j;

x_i : variável binária de decisão para cada trecho i;

C_i : investimento ou custo referente a execução da manutenção no trecho i [R\$];

W_i : mão de obra ou força de trabalho exigida para a manutenção do trecho i [dias];

R_i : índice de risco associado aos defeitos no trecho i [ur];

S_i : quantidade de dormentes a serem aplicados no trecho i [und];

T_i : extensão de trilhos a serem substituídos no trecho i [m];

B_i : extensão de lastro a ser aplicado no trecho i [m].

4.5 Formulação da Função Execução

Uma vez que as metas são definidas, é proposta uma função objetivo que buscará minimizar a soma ponderada das variáveis de desvio percentuais dos valores alvo definidos para cada uma das metas. Dessa forma, o tomador de decisão poderá priorizar as metas, normalizadas percentualmente, que serão ponderadas de modo que os desvios sejam menores para as metas mais importantes. O tratamento percentual da ponderação dos desvios se faz importante por permitir a comparação dos desvios em um mesmo nível de grandeza. Portanto, conforme adaptação do trabalho de Rehman e Romero (1984), a função execução e as respectivas metas são definidas a seguir:

$$\min \sum_{j=1}^6 \left(\alpha_j \frac{\rho_j}{M_j} + \beta_j \frac{\eta_j}{M_j} \right)$$

Sujeito a:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^I (x_i \cdot C_i) + \eta_1 - \rho_1 &= M_1 \\ \sum_{i=1}^I (x_i \cdot W_i) + \eta_2 - \rho_2 &= M_2 \\ \sum_{i=1}^I (x_i \cdot R_i) + \eta_3 - \rho_3 &= M_3 \\ \sum_{i=1}^I (x_i \cdot S_i) + \eta_4 - \rho_4 &= M_4 \end{aligned}$$

$$\sum_{i=1}^I (x_i \cdot B_i) + \eta_5 - \rho_5 = M_5$$
$$\sum_{i=1}^I (x_i \cdot T_i) + \eta_6 - \rho_6 = M_6$$

Onde:

$\eta_j, \rho_j \geq 0$ para todo j

$M_j > 0$ para todo j

$0 < \alpha_j \leq 10$

$0 < \beta_j \leq 10$

$x_i = 0$ ou $x_i = 1$

sendo α_j e β_j os pesos dos desvios para baixo e para cima da meta j .

5 APLICAÇÃO DO MODELO

Este capítulo apresenta uma aplicação prática da proposta de priorizar a manutenção de superestrutura ferroviária através da Programação por Metas, cuja modelagem foi apresentada anteriormente.

5.1 Considerações Iniciais

A aplicação prática do modelo proposto considerou a utilização de dados fictícios, gerados aleatoriamente a partir da função ALEATÓRIO() (na versão em português br) do *software* Microsoft Excel. A opção pela utilização de dados aleatórios é devida, em grande parte, a falta de dados públicos e indisponibilidade de empresas ferroviárias em revelarem informações estratégicas aos seus negócios. Nas situações que envolviam distribuição de dados, foi utilizada a distribuição triangular, pela facilidade no manuseio ao trabalhar com os valores máximos, médios e mínimos.

5.2 Dados do Modelo

O modelo proposto para priorização dos trechos ferroviários que sofrerão intervenção de manutenção é, então, aplicado em uma ferrovia fictícia com quantidade de defeitos de materiais de superestrutura simulados de forma aleatória por meio de distribuição triangular. O modelo de PM considera a divisão da ferrovia em partes iguais e busca indicar, a partir das variáveis de decisão, quais trechos devem ter a manutenção priorizada de forma a minimizar os desvios percentuais dos valores alvo para cada meta. Por fim, a seleção é realizada conforme critério estabelecido pelo decisor por meio do suplemento *solver* do *software* Microsoft Excel.

A estimativa dos custos de intervenção e quantidade de mão de obra necessários para cada atividade (substituição de dormentes, aplicação de lastro e substituição de trilhos) em quantidades unitárias foi baseada nas tabelas de referência SICRO do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes para uma ferrovia com dormentes de madeira, composta por trilho TR-57 e 1.750 dormentes por quilômetro e são apresentadas no Quadro 6.

Quadro 6 – Valores unitários de referência

Atividade	Mão de Obra	Valor Unitário
Substituição de dormente	0,40 HH/dormente	R\$ 165,50 /dormente
Aplicação de lastro ferroviário	0,42 HH/m	R\$ 65,01 /m
Substituição de trilho	0,15 HH/m	R\$ 517,25 /m

Fonte: adaptado de DNIT, 2018

5.2.1 Dados Gerais

Para a simulação, foi adotada uma ferrovia com extensão de 100 quilômetros, dividida em 100 trechos de 1 km cada, e quantidade de defeitos de materiais de superestrutura simulados de forma aleatória, cujos valores totais são apresentados no Quadro 7.

Quadro 7 – Parâmetros da ferrovia simulada

Item	Quantidade
Extensão total [km]	100
Dormentes inservíveis [und]	60.885
Extensão de lastro inservível [m]	36.995
Extensão de trilhos inservíveis [m]	28.566

A estimativa das necessidades de dormentes, trilho e lastro foram calculadas a partir de percentuais de defeitos selecionados em relação ao total de material disponível em uma ferrovia de 100 km. A distribuição aleatória triangular dos defeitos considerou o valor mínimo de 30% e máximo de 130% do valor médio de cada tipo de defeitos em cada trecho (100 km divididos em 100 trechos de igual extensão). O Quadro 8 apresenta os parâmetros utilizados na estimativa da distribuição triangular dos defeitos.

Quadro 8 – Parâmetros de defeitos da distribuição triangular

Item	Total Defeitos	% Defeitos	Quantidade de defeitos	Mínimo por trecho	Média por trecho	Máximo por trecho
Dormentes (und)	175.000	35%	61.250	184	613	796
Lastro (m)	100.000	40%	40.000	120	400	520
Trilho (m)	200.000	15%	30.000	90	300	390

A partir dos dados iniciais, cada um dos cem trechos recebeu aleatoriamente uma parcela referente a quantidade necessária de material, mão de obra (em dias de trabalho) e investimento, bem como o respectivo risco associado à necessidade de manutenção e aos fatores inerentes à localização dos defeitos. Os valores relacionados ao risco, em cada trecho, também foram estimados de forma aleatória através de distribuição triangular considerando os valores mínimo 1, médio 2 e máximo 5. A Tabela 8 no capítulo 8, Anexo, apresenta todos os valores estimados e calculados em cada trecho da ferrovia simulada.

Como nas situações práticas existem restrições orçamentárias, considera-se como estratégia do decisor que o orçamento disponível para a seleção dos trechos a serem trabalhados é de aproximadamente 75% da necessidade real e que os valores alvo das demais metas são iguais a 85% do valor total de cada atributo, conforme Quadro 9, cabendo ao decisor realizar os *trade-offs* de forma a avaliar possíveis extrapolações do orçamento disponível.

Quadro 9 – Metas do modelo proposto

	Trechos	Investimento	Dias de Trabalho	Redução do Risco	Dormentes	Lastro	Trilho
Necessidade	100	27.257.332	555	681.150	60.885	36.995	28.566
Valores alvo	-	20.442.999	472	578.978	51.753	31.446	24.281

5.2.2 Composição do Índice de Risco

A estimativa do índice de risco considera uma combinação entre a medida e a criticidade dos defeitos existentes (dormentes, lastro e trilhos) relacionadas à gravidade envolvendo a localização desses defeitos. Os valores referentes à gravidade em cada trecho, assim como a medida dos defeitos, foram calculados aleatoriamente através de distribuição triangular. A equação para a estimativa do índice de risco, medido em unidades de risco, é representada a seguir:

$$R_i = \sum_{m=1}^M (u_m \cdot \delta_{im}) \sum_{n=1}^N (g_n \cdot \lambda_{in})$$

Onde:

i : cada trecho ou divisão da ferrovia em l partes iguais ($i = 1, 2, 3, \dots, l$);

m : tipo de defeito analisado: dormente ($m = 1$), lastro ($m = 2$), trilho ($m = 3$);

n : critério referente à localidade do defeito: demográfico ($n = 1$), ambiental ($n = 2$), geométrico ($n = 3$);

u_m : fator de ponderação referente à criticidade ou urgência do defeito m : dormente ($u_1 = 1$), lastro ($u_2 = 2$), trilho ($u_3 = 5$);

g_n : peso referente a gravidade de cada um dos n critérios de avaliação da localidade;

δ_{im} : medida ou extensão do defeito m no trecho i ;

λ_{in} : fator de ponderação referente à gravidade da localidade referente ao critério n no trecho i .

5.2.3 Parâmetros do Solver

Na definição dos parâmetros do Solver, a primeira etapa é definir uma célula como objetivo do modelo de Programação por Metas e inserir a soma dos desvios de cada meta associada aos seus respectivos fatores de ponderação nessa mesma célula. Essa soma sintetiza as equações da função execução e deve ser minimizada.

A etapa seguinte é a indicação das variáveis do modelo. As variáveis do modelo são os valores binários referentes à opção pela manutenção ou não do trecho (cada divisão da ferrovia em partes iguais) e os desvios positivos e negativos de cada meta definida: custo, mão de obra, redução de risco, substituição de dormente, substituição de trilho e aplicação de lastro.

Por fim, as restrições a serem definidas no modelo são a definição das variáveis de opção por manutenção como variáveis binárias, a não negatividade dos desvios positivos e negativos de cada meta definida para o modelo e que a meta definida possua o mesmo valor que o calculado pelo modelo acrescido de cada desvio para

baixo e subtraído de cada desvio para cima. A Figura 11 ilustra os parâmetros da ferramenta *Solver* adotados no modelo, onde as células são indicadas conforme a posição na planilha eletrônica.

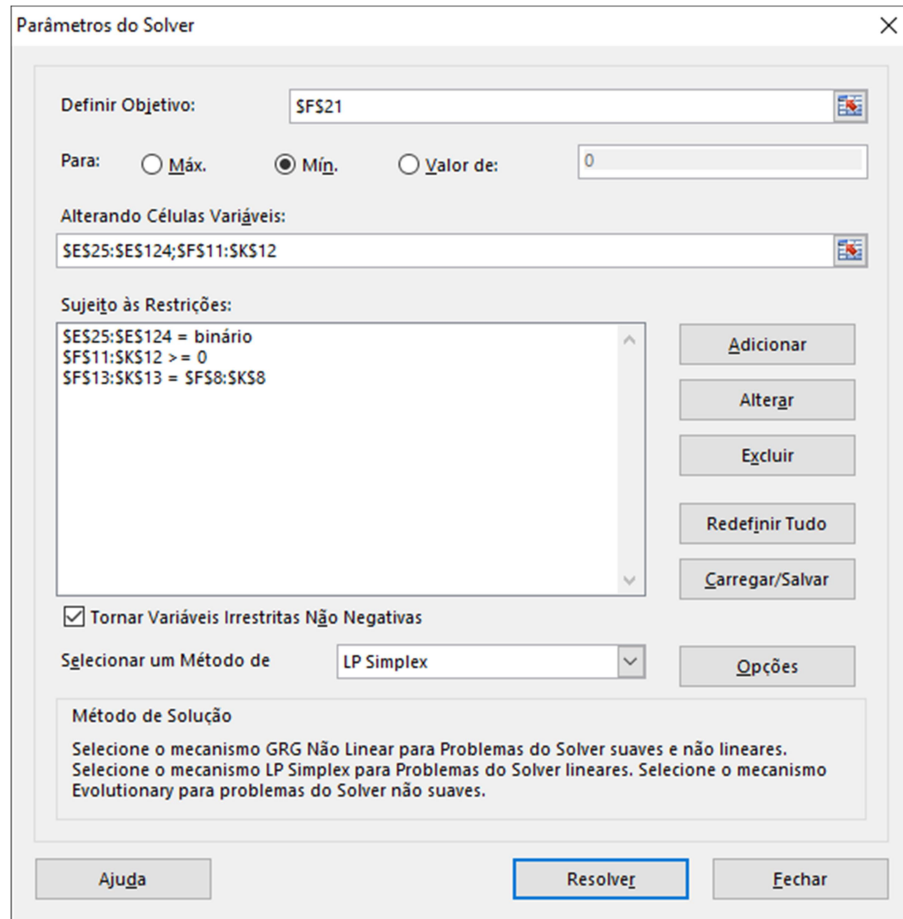


Figura 11 – Janela de edição dos parâmetros do *Solver*

5.3 Resultados do Modelo

Para o Primeiro Cenário, de acordo com o planejamento estratégico da manutenção da ferrovia, os objetivos contidos no modelo de seleção de projetos têm os seguintes níveis de prioridade:

- Prioridade 1: Investimento;
- Prioridade 2: Dias de trabalho;
- Prioridade 3: Redução do risco;

- Prioridade 4: Aplicação de dormentes;
- Prioridade 5: Aplicação de lastro;
- Prioridade 6: Substituição de trilhos.

Desse modo, o modelo irá selecionar o trecho que irá receber a intervenção de investimentos levando em consideração que, quanto maior for o valor dos pesos das variáveis de desvio de um objetivo, maior será o nível de sua prioridade. Isso se deve ao fato de que a função objetivo do modelo buscará minimizar a soma ponderada das variáveis de desvio percentual dos valores alvo.

PROCEDIMENTO PARA SELEÇÃO DE MANUTENÇÃO FERROVIÁRIA ATRAVÉS DE PM							
Trechos	Custo	Dias de Trabalho	Redução do Risco	Dormentes	Lastro	Trilho	
Necessidade	100	27.257.332	555	681.150	60.885	36.995	28.566
Valores alvo	-	20.442.999	472	578.978	51.753	31.446	24.281
Calculado	76	20.444.856	438	544.744	47.675	30.252	20.470
+ Abaixo (ni)	0	34	34.234	4.078	1.194	3.811	
- Acima (pi)	1.857	0	0	0	0	0	
Meta	20.442.999	472	578.978	51.753	31.446	24.281	
Desvio %	Abaixo	0,0%	7,2%	5,9%	7,9%	3,8%	15,7%
	Acima	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Pesos	Abaixo (ui)	0	1	5	3	3	3
	Acima (vi)	10	0	0	0	0	0
Objetivo	71,8%						
Trecho	Manutenção	Custo	Dias de Trabalho	Redução do Risco	Dormentes	Lastro	Trilho
1	1	223.928	6	7.771	734	443	142
2	1	239.052	6	4.309	813	242	172
3	1	326.786	7	6.776	750	495	330
4	0	177.947	3	5.122	312	127	228
5	1	256.688	4	7.881	324	248	362
100	1	320.710	7	10.426	707	583	320
Total	76	20.444.856	438	544.744	47.675	30.252	20.470

Figura 12 – Planilha eletrônica do modelo, com o primeiro cenário simulado

A Figura 12 apresenta a planilha eletrônica desenvolvida para o modelo, simulando um primeiro cenário a partir de prioridades pré-estabelecidas. Os pesos para o cenário são definidos nas células F18:K19 e o modelo define a melhor solução alterando as células binárias de escolha do trecho que sofrerá intervenção em manutenção (células E25:E124, apresentadas resumidamente na Figura 12) em conjunto com as células F11:K12, restrições flexíveis que apresentam o resíduo das metas não alcançadas.

Assumindo essas premissas, para o Primeiro Cenário, o modelo selecionou a realização da manutenção em 76 trechos dentre os 100 existentes, como apresentado na Tabela 4. Pode ser observado que neste caso a única meta que não apresentou desvio foi a de investimento, tendo em vista que seu estouro não seria aceitável e recebeu peso máximo. Todas as outras metas apresentaram desvio abaixo de seus valores alvo.

Tabela 4 – Resultados do primeiro cenário simulado

Objetivo	Necessidade	Alvo	Valor Alcançado	Diferença	Desvio + (%)	Desvio - (%)	Peso Acima	Peso Abaixo
CUSTO	27.257.332	20.442.999	20.444.856	1.857	0%	0%	10	0
DIAS	555	472	438	-34	0%	7%	0	1
RISCO	681.150	578.978	544.744	-34.234	0%	6%	0	5
DORM	60.885	51.753	47.675	-4.078	0%	8%	0	3
LASTRO	36.995	31.446	30.252	-1.194	0%	4%	0	3
TRILHO	28.566	24.281	20.470	-3.811	0%	16%	0	3

A Tabela 5 apresenta um Segundo Cenário, simulado com as ordens de prioridade dos objetivos de aplicação de materiais e redução de risco invertidas em relação ao Primeiro Cenário, mas mantendo a restrição em ultrapassar o investimento disponível. Dessa forma, é possível notar que essa opção apresenta estouro de 1% no orçamento que gerou uma redução inferior no risco existente e uma maior aplicação de materiais. A partir dessa alteração, o modelo selecionou 77 trechos, frente aos 76 do Primeiro Cenário.

Tabela 5 – Resultados do segundo cenário simulado

Objetivo	Necessidade	Alvo	Valor Alcançado	Diferença	Desvio + (%)	Desvio - (%)	Peso Acima	Peso Abaixo
CUSTO	27.257.332	20.442.999	20.729.629	286.630	1%	0%	10	0

DIAS	555	472	447	-25	0%	5%	0	1
RISCO	681.150	578.978	537.862	-41.116	0%	7%	0	2
DORM	60.885	51.753	49.108	-2.645	0%	5%	0	5
LASTRO	36.995	31.446	30.777	-669	0%	2%	0	5
TRILHO	28.566	24.281	20.496	-3.785	0%	16%	0	5

O Terceiro Cenário, mostrado na Tabela 6, priorizou a aplicação de materiais e redução do risco, flexibilizando a meta de investimentos. Dessa forma a redução dos desvios dessa meta foi bastante acentuada, resultando num estouro de 8% no orçamento e priorizando a manutenção em 82 trechos.

Tabela 6 – Resultados do terceiro cenário simulado

Objetivo	Necessidade	Alvo	Valor Alcançado	Diferença	Desvio + (%)	Desvio - (%)	Peso Acima	Peso Abaixo
CUSTO	27.257.332	20.442.999	22.087.474	1.644.475	8%	0%	2	0
DIAS	555	472	467	-5	0%	1%	0	1
RISCO	681.150	578.978	579.558	580	0%	0%	0	5
DORM	60.885	51.753	51.742	-10	0%	0%	0	5
LASTRO	36.995	31.446	31.495	49	0%	0%	0	5
TRILHO	28.566	24.281	22.188	-2.093	0%	9%	0	5

O Quarto Cenário considerou prioritariamente a otimização da mão de obra disponível, aumentando o peso dos dias de trabalho e reduzindo a prioridade de investimento e redução de risco, mantendo certa importância da aplicação de materiais. Desse modo, o modelo selecionou a priorização da manutenção em 83 trechos, zerando os desvios da meta de dias trabalhados e apresentando aplicações de dormentes com desvios próximos de zero e aplicação de lastro superior ao estabelecido como meta. Já a quantidade de trilhos a serem substituídos apresentou um desvio inferior de 8%, que pode ser explicado pelo seu elevado valor unitário. A Tabela 7 apresenta os resultados do quarto cenário simulado.

Tabela 7 – Resultados do quarto cenário simulado

Objetivo	Necessidade	Alvo	Valor Alcançado	Diferença	Desvio + (%)	Desvio - (%)	Peso Acima	Peso Abaixo
CUSTO	27.257.332	20.442.999	22.234.093	1.791.094	9%	0%	1	0
DIAS	555	472	472	0	0%	0%	0	5
RISCO	681.150	578.978	579.625	648	0%	0%	0	1
DORM	60.885	51.753	51.787	34	0%	0%	0	3

LASTRO	36.995	31.446	32.090	644	2%	0%	0	3
TRILHO	28.566	24.281	22.382	-1.899	0%	8%	0	3

5.4 Análise dos Resultados

No Primeiro Cenário, as prioridades foram definidas considerando principalmente o orçamento disponível e, a partir dos resultados alcançados, foram invertidas as prioridades de outros objetivos para a geração do Segundo Cenário, onde o modelo indicou menores desvios negativos em relação às metas propostas, porém com uma variação de 1,4% no desvio positivo da meta orçamento.

Visando uma maior redução dos desvios, no Terceiro Cenário, o desvio positivo da meta de orçamento passou a ter prioridade menor em relação às demais. Esse cenário resultou no menor desvio negativo total da carteira, porém com estouro no orçamento. Por fim, no último cenário, foi avaliado a otimização máxima da mão de obra disponível.

A comparação entre as quatro situações permite avaliar e escolher a melhor seleção dos projetos propostos. Os *trade-offs* realizados entre cada uma das quatro situações auxiliam na tomada de decisão, uma vez que o decisor pode avaliar a redução do desvio de uma meta em detrimento ao aumento ou redução dos desvios das demais. É importante reforçar que não existe a melhor situação dentre as quatro apresentadas e que a escolha da melhor fica nas mãos do decisor, conforme suas necessidades e avaliação de prioridade.

A Figura 13 apresenta os desvios das metas de cada objetivo nos 4 cenários. Para facilitar a apresentação desses desvios, convencionou-se que os desvios positivos das metas seriam expressos acima do eixo da figura e os desvios negativos das metas seriam representados abaixo do eixo da figura. Vale ressaltar, porém, que todos os desvios têm valores positivos.

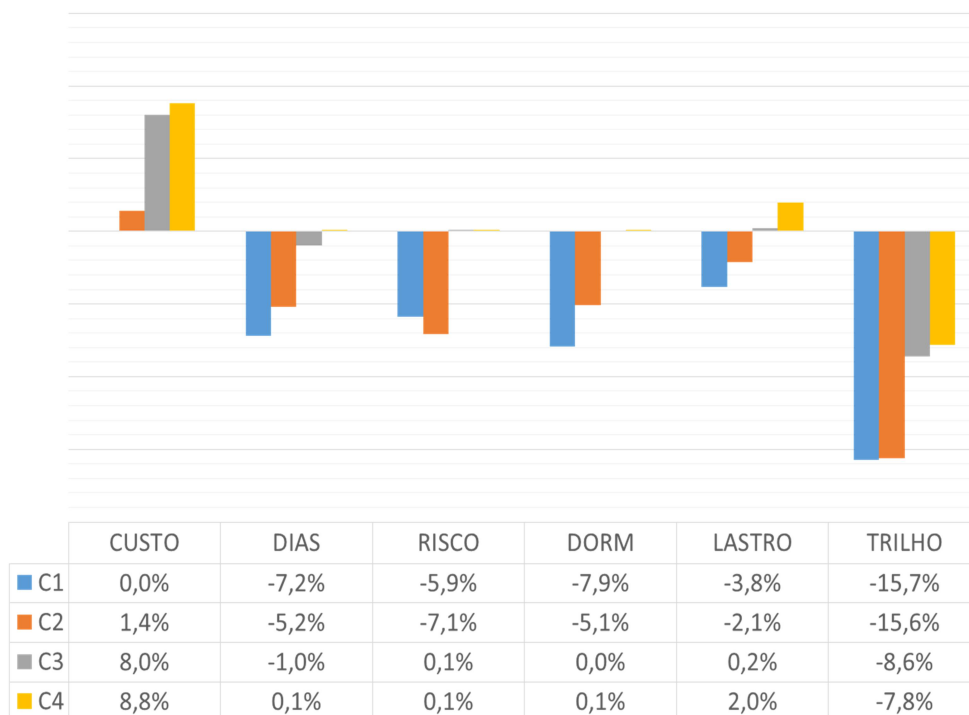


Figura 13 – Desvios percentuais verificados em cada cenário, por meta

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A utilização de técnicas de otimização por múltiplos critérios tem crescido a cada ano em diversos campos de aplicação. Dentre essas técnicas se destaca a Programação por Metas, na qual as metas são formuladas pela associação de alvos a serem atingidos em cada objetivo, tendo ainda uma função objetivo que busca minimizar a soma dos desvios absolutos dessas metas.

Com base na Programação por Metas, foi proposto um modelo para priorização da manutenção de trechos ferroviários, buscando a melhor aplicação de materiais de superestrutura com foco em indicadores de manutenção, financeiros e de redução de risco, que foi aplicado em uma ferrovia com extensão de 100 km. A solução verificada se mostrou uma alternativa viável para o planejamento orçamentário no nível estratégico.

Para avaliação dos trade-off realizados com a alteração da prioridade dos objetivos, foram gerados 4 cenários de seleção, variando os pesos das variáveis de desvios das metas, o que influenciou diretamente o resultado da programação. Os cenários foram gerados em sequência, a partir da análise das variáveis de desvio das metas e não do valor obtido pela função objetivo de cada cenário anterior, uma vez que com a mudança dos pesos das variáveis de desvio em cada cenário resulta em situações diferentes.

O modelo desenvolvido se mostrou útil na escolha dos locais de aplicação de materiais de superestrutura, porém fica claro que é apenas uma ferramenta para auxiliar o tomador de decisão, que deve definir as metas a serem priorizadas conforme a estratégia da organização já que a mudança desses valores influencia diretamente os resultados alcançados pelo modelo. Além de priorizar as metas mais importantes, a partir dos resultados do modelo, o tomador de decisão pode também redefinir os valores alvo de suas metas, buscando uma harmonia com os resultados possíveis frente aos objetivos existentes.

Vale ressaltar que mesmo que o software utilizado tenha se mostrado bastante amigável e adequado para a implementação do modelo, este pode apresentar limitações em aplicações mais robustas, a partir do aumento da complexidade do

problema a ser modelado, como adições de variáveis ou metas, bem como em uma maior quantidade de subdivisões do modelo ou maiores intervalos de tempo.

Como sugestão para futuros trabalhos e possíveis aprimoramentos da ferramenta estão a inclusão da manutenção preventiva de infraestrutura ferroviária para ser analisada em conjunto com a superestrutura. Outro acréscimo importante seria a adição de uma interface gráfica, com a possível utilização de dados georreferenciados, de forma que fosse possível a visualização da ferrovia como um todo, antes e após a definição da estratégia de manutenção.

7 REFERÊNCIAS

AHERN, A.; ANANDARAJAH, G. **An optimisation model for prioritising transport projects**. Proceedings of ICE.Transport (Online), Transport v. 161, 2008.

ANTT. **Relatório de Acompanhamento das Concessões Ferroviárias 2009 a 2013**. Disponível em: <<http://www.antt.gov.br/index.php/content/view/4994/Relatorios.html>>. Acesso em 25/01/2018.

AOUNI, B.; KETTANI, O. **Goal programming model: a glorious history and a promising future**. European Journal of Operational Research, v. 133, 2001.

AOUNI, B; COLAPINTO, C; LA TORRE, D. **Financial portfolio management through the goal programming model: Current state-of-the-art**. European Journal of Operational Research, v. 234, 2014.

AVINERI, E.; PRASHKER, J.; CEDER, A. **Transportation projects selection process using fuzzy sets theory**. Fuzzy Sets and Systems, v. 116, 2000.

COLAPINTO, C.; JAYARAMAN, R.; MARSIGLIO, S. **Multi-criteria decision analysis with goal programming in engineering, management and social sciences: a state-of-the art review**. Annals of Operations Research, março, 2015.

DAHER, P. H. D. C. **Procedimento para Seleção de Investimentos Ferroviários Baseado em Programação por Metas**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil e Transportes. Universidade Federal do Espírito Santo, 2017.

FERREIRA, J. A. (2010). **Intervenções de Construção, Renovação e Manutenção na Via-Férrea**. Porto: Dissertação de mestrado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

GREGORACCI, Roberta Bueno. **Análise das Fraturas de Trilho**. Belo Horizonte: PUC Minas, 2006.

HUANG, X. **Optimal project selection with random fuzzy parameters**. International Journal of Production Economics, V. 106, 2007.

JONES, D. F. **Goal Programming in the Period 1990-2000**. In: EHRGOTT, Matthias; GANDIBLEUX, Xavier. Multiple Criteria Optimization: State of the Art Annotated

Bibliographic Surveys. United Kingdom: Springer Verlag, 2004. p. 129-170. (International Series in Operations Research & Management Science, v.52).

MAGALHÃES, Paulo César B. **Apostila de Prevenção do Descarrilamento de Trens do Programa de Pós Graduação em Engenharia Ferroviária**. Belo Horizonte: PUC Minas, 2011a.

MAGALHÃES, Paulo César Barroso. **Apostila de Via Permanente do Programa de Pós Graduação em Engenharia Ferroviária**. Belo Horizonte: PUC Minas, 2011b.

MARGUERON, M. V. **Processo de tomada de decisão sob incerteza em investimentos internacionais na exploração & produção de petróleo: uma abordagem multicritério**. Dissertação de mestrado – Curso de Pós-Graduação em Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2003.

MINISTÉRIO DOS TRANSPORTES. **Descrição da malha ferroviária brasileira**. Disponível em: <<http://www.transportes.gov.br/transporte-ferroviario.html>>. Acesso em 16/01/2018.

MORAIS NETO, G. **Sistema Decisório Interativo de Alocação de Fluxo de Cargas**. Dissertação de mestrado – Curso de Pós-Graduação em Sistemas e Computação, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 1988.

MUNIZ, Luiz Francisco. **Apostila de Tópicos Especiais de Infraestrutura Ferroviária do Programa de Pós Graduação em Engenharia Ferroviária**. Belo Horizonte: PUC Minas, 2011.

NETO, Camilo Borges. **Manual Didático de Ferrovias**. Curitiba: UFPR, 2010.

NIEMEIER, D.; ZABINSKY, Z.; ZENG, Z.; RUTHERFORD, G. **Optimization models for transportation project programming process**. Journal of Transportation Engineering, 1995.

PEDRONI, Patrick Guedes. **Análise de Falhas das Fraturas de Trilhos: O Caso da Ferrovia do Aço**. Rio de Janeiro: IME, 2008.

RAMOS, M.; BOIX, M.; MONTASTRUC, L.; DOMENECH, S. **Multiobjective Optimization Using Goal Programming for Industrial Water Network Design**. Industrial & engineering chemistry research, 2014.

REVISTA FERROVIÁRIA. **Anuário RF 2016: O Mais Completo Guia do Setor Metroviário Brasileiro**. São Paulo, 2017.

SILVA, A. F.; MARINS, F. A. S. **Revisão da literatura sobre modelos de Programação por Metas determinística e sob incerteza**. Production. Associação Brasileira de Engenharia de Produção, v. 25, n. 1, p. 92-112, 2015.

TAMIZ, M.; JONES, D. **A review of Goal Programming and its applications**. Annals of Operation Research, v. 58, 1995.

TAMIZ, M.; JONES, D. **Goal programming for decision making: An overview of the current state-of-the-art**. European Journal of Operational Research, v. 111, 1998.

TAMIZ, M.; JONES, D. **Practical Goal Programming**. Springer Books, 2010.

TENG, J.; TZENG, G. **A multiobjective programming approach for selecting non-independent transportation investment alternatives**. Transportation Research. Part B: Methodological, v. 30, 1996.

TENG, J.; TZENG, G. **Transportation investment project selection using fuzzy multiobjective programming**. Fuzzy Sets and Systems, v. 96, 1998.

ULIANA, A. **Utilização de programação por metas como auxílio à tomada de decisão na distribuição de gás natural**. Dissertação de mestrado – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória, 2010.

VARGAS, R. **Utilizando a Programação Multicritério (Analytic Hierarchy Process – AHP) para Selecionar e Priorizar Projetos na Gestão de Portfólio**. PMI Global Congress – North America, Washington DC, EUA, 2010.

WEY, W.; WU, K. **Using ANP priorities with goal programming in resource allocation in transportation**. Mathematical and Computer Modelling, v. 46, 2007.

8 ANEXO

Tabela 8 – Dados da ferrovia simulada

Trecho	Dormentes Inservíveis (und)	Lastro Insuficiente (m)	Trilho Inservível (m)	Custo (R\$)	Homens Hora	Risco Demografia	Risco Ambiental	Risco Geometria	Fator de Risco Associado
1	734	443	142	223.928	501	2	5	3	7.771
2	813	242	172	239.052	452	1	2	3	4.309
3	750	495	330	326.786	557	1	1	4	6.776
4	312	127	228	177.947	213	2	4	3	5.122
5	324	248	362	256.688	288	2	4	3	7.881
6	432	502	157	185.118	407	2	3	3	5.916
7	529	295	316	270.093	383	2	1	3	5.397
8	684	280	227	248.856	425	5	1	3	7.138
9	347	337	316	242.720	328	3	2	3	6.935
10	698	224	260	264.547	412	2	2	1	4.075
11	715	207	348	311.734	425	4	2	3	8.607
12	652	424	393	338.706	498	1	3	1	5.773
13	472	395	358	288.759	408	5	4	3	12.200
14	709	175	283	274.809	399	1	2	4	5.767
15	714	381	157	224.326	469	1	4	1	4.526
16	513	305	176	195.744	360	4	3	2	6.008
17	447	368	270	237.539	374	2	3	4	7.599
18	353	316	349	259.273	326	2	2	2	5.456
19	455	445	243	229.988	405	1	3	2	5.121
20	631	202	416	332.934	400	3	1	2	6.232
21	528	482	312	280.244	460	2	3	1	6.107
22	729	426	405	357.766	531	2	2	5	10.817
23	621	469	320	298.595	493	3	2	5	10.522
24	679	365	439	362.922	491	2	3	3	9.605
25	909	286	252	299.324	521	2	3	2	6.393
26	605	550	313	297.688	520	4	3	1	8.718
27	648	237	194	222.775	388	1	2	3	4.179
28	921	601	388	392.406	679	1	2	2	6.775
29	528	358	174	200.353	387	4	2	3	6.333
30	458	374	229	218.531	375	4	2	3	7.053
31	687	491	193	245.272	510	3	2	3	7.021
32	735	385	332	318.584	506	1	2	4	7.389
33	560	241	160	190.939	349	2	4	1	4.294
34	699	400	312	302.845	494	4	2	3	9.172
35	731	403	409	358.792	523	2	1	5	9.554
36	509	530	271	258.753	467	2	2	1	4.870
37	757	351	172	236.835	476	5	2	5	9.268
38	866	429	147	247.585	549	2	2	1	4.104
39	765	372	374	344.018	518	2	3	2	7.881

Trecho	Dormentes Inservíveis (und)	Lastro Insuficiente (m)	Trilho Inservível (m)	Custo (R\$)	Homens Hora	Risco Demografia	Risco Ambiental	Risco Geometria	Fator de Risco Associado
40	463	329	251	227.984	361	5	1	4	7.926
41	695	547	308	309.821	554	1	3	2	6.658
42	640	287	374	317.863	433	1	1	1	3.082
43	861	340	312	325.793	534	2	4	1	7.232
44	380	322	251	213.664	325	2	5	3	7.597
45	707	475	350	328.712	535	2	1	3	6.810
46	398	348	379	284.609	362	2	2	3	6.975
47	921	330	238	296.814	543	3	1	2	5.537
48	610	218	252	245.393	373	4	2	5	8.452
49	367	262	233	198.486	292	3	1	1	3.429
50	647	372	277	274.755	457	1	2	3	5.556
51	341	232	318	235.906	281	2	4	2	6.385
52	704	275	142	208.004	418	3	2	4	5.895
53	701	337	323	305.115	470	1	2	3	5.982
54	631	305	448	355.754	448	3	1	2	6.958
55	654	523	353	324.868	535	1	5	3	10.398
56	692	513	409	359.626	554	4	3	2	11.295
57	564	403	219	232.617	427	1	2	2	4.104
58	914	356	270	314.053	556	2	1	3	5.950
59	562	406	287	267.633	438	2	1	5	7.483
60	473	241	161	177.395	315	4	4	4	7.048
61	243	535	261	209.910	361	2	1	2	4.363
62	701	600	402	362.789	593	2	3	2	9.120
63	485	425	379	303.804	430	3	3	2	8.610
64	623	446	148	208.783	459	5	3	2	7.523
65	763	473	201	260.824	534	1	2	4	6.330
66	477	342	180	194.393	362	1	2	3	4.126
67	675	559	378	343.621	561	1	5	2	9.824
68	708	353	287	288.405	474	3	2	3	7.594
69	278	323	349	247.379	299	3	3	3	8.002
70	572	356	189	215.643	407	2	3	3	5.948
71	701	489	251	277.828	524	1	2	4	6.851
72	359	259	299	231.028	298	1	1	1	2.373
73	759	412	383	350.646	534	3	3	3	10.496
74	591	363	434	345.911	454	3	3	1	8.137
75	410	253	314	246.621	317	2	2	1	4.142
76	706	311	143	211.159	434	4	4	3	7.493
77	332	310	343	252.547	315	2	3	2	6.223
78	570	130	173	192.574	309	1	5	4	5.661
79	804	305	250	281.955	487	1	2	5	7.096
80	556	341	145	189.050	387	1	2	1	2.617
81	912	307	336	344.831	544	4	2	1	7.485
82	617	501	246	262.085	494	2	2	2	5.702

Trecho	Dormentes Inservíveis (und)	Lastro Insuficiente (m)	Trilho Inservível (m)	Custo (R\$)	Homens Hora	Risco Demografia	Risco Ambiental	Risco Geometria	Fator de Risco Associado
83	665	284	338	303.601	436	1	3	3	6.824
84	628	495	240	260.346	495	2	2	4	7.516
85	929	374	360	364.456	583	2	1	2	5.797
86	559	505	239	249.121	472	2	4	1	6.452
87	667	324	232	251.421	438	1	2	2	4.125
88	643	266	427	344.871	433	2	3	2	7.731
89	329	280	384	271.135	307	2	4	2	7.486
90	843	572	305	334.297	623	2	3	2	8.190
91	862	541	333	350.010	622	3	3	1	8.419
92	252	369	191	164.470	284	3	5	2	6.482
93	688	366	419	354.461	492	5	3	1	10.546
94	556	126	272	240.824	316	3	2	2	5.055
95	308	502	332	255.117	384	3	2	1	5.941
96	522	262	235	225.165	354	2	2	4	5.929
97	628	293	339	298.276	425	3	2	3	7.754
98	672	376	323	302.467	475	4	2	1	7.086
99	439	504	137	176.157	408	2	3	1	4.262
100	707	583	320	320.710	576	5	2	2	10.426
Total	60.885	36.995	28.566	27.257.332	44.177				681.150