

# Seleção de projetos de investimentos correntes em uma ferrovia através de programação por metas

Pedro Henrique Del Caro Daher<sup>1</sup>, Gregório Coelho de Moraes Neto<sup>2</sup>,  
Marta Monteiro da Costa Cruz<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal do Espírito Santo, phdaher@gmail.com

<sup>2</sup>Universidade Federal do Espírito Santo, gregorioufes@msn.com

<sup>3</sup>Universidade Federal do Espírito Santo, marta.cruz@ufes.br

**Recebido:**

29 de maio de 2017

**Aceito para publicação:**

28 de março de 2018

**Publicado:**

30 de abril de 2019

**Editor de área:**

Marcio D'Agosto

**Palavras-chaves:**

Seleção de investimentos;

Transporte ferroviário;

Programação por metas

**Keywords:**

Sustaining projects selection;

Railway transportation;

Goal programming.

**RESUMO**

Selecionar alternativas de investimentos correntes de acordo com recursos financeiros disponíveis configura-se como um problema clássico de otimização e dentre as diversas técnicas existentes destaca-se a Programação por Metas, uma técnica de programação por objetivos múltiplos. Esse artigo irá apresentar um modelo de programação por metas ponderada, aplicado na seleção de uma carteira de projetos de investimentos ferroviários, utilizando o suplemento *Solver* do *Microsoft Excel*. Os resultados obtidos mostraram que o modelo é uma importante ferramenta de apoio a tomada de decisão e que, com os ajustes necessários, pode ser utilizado para selecionar projetos de outras naturezas.

**ABSTRACT**

Sustaining projects selection is configured as a classic optimization problem and one of the most used techniques in this case is Goal Programming, a multi-criteria analysis technique. This article will present a Weighted Goal Programming model, implemented on *Microsoft Excel Solver* add-in, to select projects of a railway sustaining portfolio. The results achieved shows that the model is an important support tool for decision taking and with the necessary adjustments, it can be used to prioritize projects of other natures.

DOI:10.14295/transportes.v27i1.1387



## 1. INTRODUÇÃO

O modo 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 modo rodoviário, com menor índice de acidentes e menor incidência de furtos e roubos (ANTT, 2016). No Brasil, existem 3 tipos de bitola: larga (1,60m), métrica (1,00m) e a mista. Destaca-se que grande parte da malha ferroviária do Brasil está concentrada nas regiões sul e sudeste com predominância para o transporte de cargas.

Para a operação de uma ferrovia são utilizados recursos financeiros que podem ser divididos em duas categorias, sendo OPEX (*operational expenditure*) os recursos utilizados para a manutenção dos bens e ativos, além da remuneração de pessoal, e CAPEX (*capital expenditure*) os

recursos utilizados para investimentos que trarão benefícios futuros. Dentro da última categoria encontram-se os investimentos correntes, que visam manter ou aumentar a produtividade dos ativos, melhorar a qualidade dos produtos/serviços fornecidos, preservar o meio ambiente e/ou as condições de trabalho ou até mesmo atender às necessidades impostas por órgãos externos e internos à concessionária.

Segundo Vargas (2010), um dos principais desafios das organizações está na sua capacidade de fazer escolhas certas e consistentes, de modo alinhado com seu direcionamento estratégico. Dessa forma, o aporte de verba para investimento em projetos que tragam retornos positivos se torna fundamental para a empresa que quer ter sucesso em seus negócios e atingir seus objetivos de longo prazo. Porém, para que a alocação de recursos seja feita de forma eficaz, é essencial a existência de um planejamento estratégico, que é uma técnica corporativa que proporciona a análise ambiental de uma empresa, identificando suas oportunidades, ameaças, pontos fortes e fracos para que saia de seu estado atual (missão) e chegue ao seu estado esperado (visão) (Do Valle et al., 2009).

Uma vez definidos os critérios que irão direcionar o decisor na alocação de recursos financeiros em um portfólio de projetos, os modelos de otimização se apresentam como uma excelente ferramenta de auxílio para a tomada de decisão. Segundo Ahern e Anandarajah (2007), esses modelos são desenvolvidos para auxiliar a tomada de decisão, dentre as quais, selecionar projetos identificados como possíveis investimentos. A seleção de projetos de investimentos ferroviários se apresenta como um problema de múltiplos objetivos e o desenvolvimento de um modelo para esse fim utilizará como metodologia a Programação por Metas (PM), técnica na qual uma ou mais metas são formuladas como restrições, tendo uma função objetivo que busca minimizar a soma dos desvios absolutos dessas metas (Ahern e Anandarajah, 2007).

Esse artigo tem como objetivo apresentar o desenvolvimento de uma ferramenta para seleção de projetos de investimentos correntes ferroviários e a aplicação da mesma para a seleção de uma carteira de 15 projetos, em situações distintas, visando sua análise e validação. A ferramenta será desenvolvida no Microsoft Excel, utilizando o suplemento *Solver*.

## 2. PROGRAMAÇÃO POR METAS

Com a complexidade existente nas organizações atuais, os tomadores de decisão tentam maximizar funções execução em geral não muito bem definidas. A propósito, os conflitos de interesses e a falta de informações completas tornam praticamente impossível a construção de uma função matemática confiável que represente as preferências do tomador de decisão. Sendo assim, com a ausência de um ambiente de decisão ideal, o tomador de decisão tenta e atinge uma série de metas (ou alvos) o mais próximo possível (Tamiz e Jones, 1998).

Modelos de tomada de decisão com múltiplos objetivos e de Programação por Metas (PM) são ferramentas importantes para os campos de Pesquisa Operacional e outras Ciências de Gestão, com aplicação extensa em Engenharia e Ciências Sociais. A complexidade existente na maioria dos problemas reais se dá pelas dificuldades na modelagem e resolução dos problemas com um único objetivo. A PM é um método que otimiza objetivos múltiplos, minimizando os desvios dos objetivos dos níveis de aspiração ou metas definidas pelo tomador de decisão. Quando os desvios são levados à zero pode-se dizer que as metas foram atingidas, porém, esses desvios também podem ser positivos ou negativos, o que significa que as metas foram atingidas abaixo ou acima do que havia sido definido, sujeito às múltiplas restrições (Colapinto et al., 2015).

A primeira aplicação da Programação por Metas foi feita por Charnes et al., em 1955, no contexto de remuneração de executivos. Naquele momento, o termo PM não foi utilizado e o modelo foi visto como uma adaptação à programação linear (Tamiz e Jones, 2010). De lá para cá a PM se tornou um dos métodos de otimização de múltiplos objetivos mais utilizados. Da pesquisa realizada para o presente trabalho, cita-se a seguir, como exemplos de aplicação na área de transportes, alguns trabalhos que utilizaram diferentes variações da PM.

Alguns autores utilizaram a PM lexicográfica, que otimiza as metas dentro de uma sequência de prioridades. Dentre eles, pode-se citar Morais Neto (1988), que desenvolveu um modelo para a alocação dos fluxos de cargas militares, buscando racionalizar os trabalhos do planejador militar e a utilização dos subsistemas de transportes disponíveis; e Ramos (1995), que aplicou a PM lexicográfica na decisão de quais alternativas ou ações mitigatórias deveriam ser adotadas em terminais marítimos petroleiros para melhorar seu desempenho operacional.

Segundo Tamiz e Jones (2010), existe uma tendência de aplicação da PM ponderada em detrimento à lexicográfica, isso graças à maior flexibilidade proporcionada pela constante de ponderação e pelo desejo dos tomadores de decisão em criar mais análises de *trade-off* e comparações diretas entre os objetivos. 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. Dentre os modelos, um utilizou a PM ponderada. Uliana (2010), utilizou a PM ponderada em conjunto com o método da utilidade associada para auxiliar a resolução do problema de distribuição de gás natural utilizando caminhos e/ou gasodutos. Yang et al. (2011), também utilizaram a PM ponderada para desenvolver um modelo de otimização de frete de uma rede intermodal da China para o oceano Índico, buscando minimizar os custos de transporte, tempo em trânsito e a variação do mesmo, garantido um fluxo contínuo e compatibilidade entre ferrovia, rodovia, navios, aviões e transportes aquáticos não oceânicos.

Ahern e Anandarajah (2007) desenvolveram um modelo de PM inteira ponderada para seleção de novos projetos de investimentos em ferrovias na Irlanda, cujo *core business* é o transporte de passageiros. Na sequência, Ahern et al. (2008) desenvolveram um modelo quadrático que foi aplicado em uma situação semelhante, de seleção de novos projetos ferroviários para trens de passageiros na Irlanda, utilizando o conceito de solução ideal, possibilitando que mais de uma solução ótima fosse identificada como a primeira, segunda, e assim pode diante, melhor solução, enquanto que o modelo de PM apresentou apenas uma única solução ótima.

Alguns autores consideraram que os métodos usuais de programação por metas 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. Como exemplo, Teng et al. (1998) 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 qualitativos e quantitativos a serem atingidos. Kahraman et al. (2008) combinaram a PM *fuzzy* com o *Analytic Hierarchy Process (AHP) fuzzy*, para priorizar projetos que utilizam a metodologia Seis Sigma, que é um conjunto de práticas que buscam encontrar e eliminar causas de defeitos ou erros em processos diversos, focando nas entregas consideradas importantes pelos clientes. Chang et al. (2009) propuseram um modelo integrado para a seleção de projetos de revitalização da ferrovia *Alishan Forest*, em Taiwan, baseado em

*fuzzy Delphi* e *Analytic Network Process* (ANP) para avaliação qualitativa dos critérios de priorização dos projetos. Os resultados dessa avaliação foram incorporados em um modelo de PM 0-1 para auxílio à tomada de decisão. 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, em um estudo de melhoria de infraestrutura de transportes na cidade de Taichung, em Taiwan.

Na sequência, serão apresentadas a terminologia e a estrutura de dois dos principais tipos de PM, a ponderada e a lexicográfica.

## 2.1. Conceitos Básicos da Programação por Metas

A conceituação do que seja objetivo e atributos é essencial para qualquer processo de tomada de decisão. Segundo Morais Neto (1988), objetivo é essencialmente uma expressão que reflete a vontade do decisor acerca de um determinado estado do sistema em questão. É uma expressão que exprime o desejo do decisor e, assim, pode ser plenamente alcançado ou não.

O autor cita ainda que um problema de decisão com objetivos múltiplos é caracterizado pela existência de vários objetivos, alguns bem definidos, outros pobremente definidos. Um conjunto de objetivos bem definidos apresenta, muitas vezes, uma estrutura hierárquica semelhante à apresentada na Figura 1:

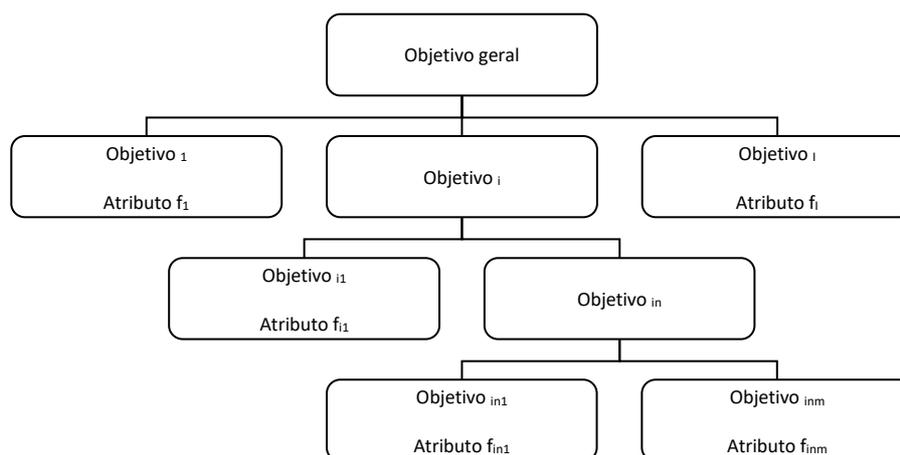


Figura 1: Hierarquia dos Objetivos. Fonte: Morais Neto (1988)

A terminologia utilizada na PM varia bastante na literatura. Dentre os diversos termos utilizados nos problemas de PM, as definições básicas citadas por Morais Neto (1988) são apresentadas a seguir:

- **Objetivo:** é todo tipo de expressão (em narrativa ou em forma quantitativa) que reflete os desejos do decisor. Por exemplo, um objetivo pode ser “maximizar o lucro” ou “minimizar os custos”;
- **Nível de aspiração:** é um valor específico que é associado a um desejável ou acessível nível de atingimento de um objetivo. É utilizado como medida para o atingimento do objetivo;
- **Meta:** todo objetivo que tenha um nível de aspiração é chamado de meta. Assim, obter um lucro de pelo menos R\$ Y, ou reduzir os custos a no máximo R\$ X são exemplos de

metas;

- Desvio de meta: é a diferença que poderá ocorrer entre o nível de atingimento alcançado para uma meta e o nível de atingimento inicialmente desejado (nível de aspiração). Um desvio da meta pode ser, portanto, “a mais” ou “a menos” em relação ao nível de aspiração. Em outras palavras, pode-se ter desvios positivos, que ocorrem quando a meta não é atingida.

Segundo Tamiz e Jones (1998), os modelos de PM podem ser classificados em dois macros grupos. No primeiro, da PM Ponderada, as variáveis de desvio recebem pesos, de acordo com sua importância estabelecida pelo decisor, e têm a seguinte função objetivo:

$$\min Z = \sum_{i=1}^I (u_i n_i + v_i p_i) \quad (1)$$

Sujeito a:

$$f_i(x) + n_i - p_i = b_i, \quad i = 1 \dots I \quad (2)$$

em que  $f_i(x)$ : função linear de  $x$ , do objetivo  $i$ ;  
 $x$ : variáveis de decisão;  
 $b_i$ : valor que se deseja atingir para cada objetivo;  
 $n_i$  e  $p_i$ : variáveis de desvio negativo e positivo do valor alvo;  
 $u_i$  e  $v_i$ : pesos associados aos desvios no atingimento da função  $z$ ; e  
 $I$ : quantidade de objetivos.

O segundo grupo, classificado como PM Lexicográfica, é baseado na otimização das metas de acordo com suas importâncias relativas para o decisor. As metas mais importantes estarão no maior nível de prioridade, enquanto as menos importantes estarão nos menores níveis. Os valores de desvios obtidos em um alto nível de prioridade serão considerados restrições em relação aos de menores níveis de prioridade. Ou seja, os objetivos de menores níveis de prioridade terão um papel secundário no processo decisório (Aouni et al., 2014). A PM Lexicográfica é representada algebricamente pela seguinte função objetivo (Morais Neto, 1988):

$$\text{Lexmin } a = [g_1(n_i, p_i), g_2(n_i, p_i), \dots, g_L(n_i, p_i)] \quad (3)$$

Sujeito a:

$$f_i(x) + n_i - p_i = b_i, \quad i = 1 \dots I \quad (4)$$

em que  $f_i(x)$ : função linear de  $x$ , do objetivo  $i$ ;  
 $x$ : variáveis de decisão;  
 $b_i$ : valor que se deseja atingir para cada objetivo;  
 $a$ : vetor ordenado dos níveis de prioridade;  
 $g_L(n_i, p_i)$ : função linear das variáveis de desvio do nível de prioridade  $L$ ;  
 $L$ : níveis de prioridade; e  
 $n_i$  e  $p_i$ : variáveis de desvio negativo e positivo da meta  $i$ .

Em resumo, a principal diferença operacional entre a PM ponderada e a lexicográfica é que na segunda os objetivos são otimizados em sequência, de acordo com o nível de prioridade que o decisor define para cada um deles. Ou seja, um modelo de PM lexicográfica só buscará a otimização do objetivo de prioridade 2 após otimizar o de prioridade 1 e assim por diante. Já na PM ponderada, o modelo é otimizado como um todo, buscando o melhor resultado de acordo com a função objetivo, respeitando os pesos atribuídos às variáveis de desvio de cada objetivo.

Nesse caso, um objetivo com peso maior que outro pode ter um desvio maior em relação ao seu valor alvo que o objetivo de menor peso. O modelo desenvolvido na sequência utilizará a PM ponderada.

## 2.2. Técnicas de Normalização

A Literatura aborda diversas vezes o uso de técnicas de normalização em problemas de PM, visando superar incomensurabilidades, que ocorrem quando as metas possuem unidades de medidas diferentes. Nesses casos, a soma dos desvios das metas realizada pela função objetivo leva a resultados incorretos e a favor das metas de maior magnitude.

Dentre as diversas técnicas de normalização citadas por Jones et al. (1995), destaca-se a da Normalização Percentual, que será utilizada neste artigo, na qual cada desvio de meta é dividido pelo seu valor alvo e então multiplicado por 100. A partir daí esses desvios passam a representar desvios percentuais das metas. O fator crítico dessa abordagem é o valor alvo da meta, pois o método só funciona bem quando os valores alvos são diferentes de zero.

## 3. MODELAGEM DO PROBLEMA

Para utilizar a PM para a modelagem do problema de seleção de investimentos ferroviários, será necessário definir os objetivos, transformá-los em metas, ou seja, definir os valores alvo para cada um, e por fim formular a função execução, conforme apresentado abaixo.

### 3.1. Definição dos Objetivos

O objetivo geral de “Seleção de projetos de investimentos correntes de uma ferrovia, conforme planejamento estratégico, indicadores financeiros e de sustentabilidade”, necessita ser decomposto em objetivos específicos, visando a identificação de seus atributos e unidades de medidas, conforme mostrados nas Tabelas 1, 2 e 3, a seguir.

**Tabela 1:** Detalhamento dos objetivos específicos

ID	Objetivo	Atributo	Unidade
1.1	Assegurar a utilização de recursos financeiros disponíveis para investimento	Recursos	R\$
1.2	Assegurar projetos viáveis financeiramente	VPL	R\$
1.3	Assegurar projetos que contribuam para o aumento da disponibilidade física da ferrovia	DF	%
1.4	Assegurar projetos que garantam as exigências mínimas de sustentabilidade do negócio	-	-

Obs: VPL é o Valor Presente Líquido do projeto e DF é o impacto na Disponibilidade Física da ferrovia causado pelo projeto

Dos objetivos listados acima, percebe-se que para o objetivo 1.4 não foram associados atributos nem medidas, pois estão descritos de forma genérica. Para fazê-los, propõe-se a decomposição desse em objetivos mais específicos, conforme Tabela 2.

**Tabela 2:** Decomposição do Objetivo de Sustentabilidade

ID	Objetivo	Atributo	Unidade
1.4.1	Assegurar projetos que contribuam para a redução da taxa de acidentes	Taxa ac.	A/MTKm
1.4.2	Assegurar projetos que atendam às expectativas de <i>stakeholders</i> externos	-	-

Obs: A/MTKm é a unidade para medir a taxa de acidentes da ferrovia, expressa em Acidentes por Milhão Trem Quilômetro

Mesmo após a segunda decomposição de objetivos, o objetivo 1.4.2 não teve atributo e medida a ele associados, por se tratar de um objetivo qualitativo. Sendo assim, para esse objetivo

podem ser identificados os seguintes sub-objetivos, dentre outros: a) Atendimento às exigências ambientais; b) Atendimento às exigências da ANTT; c) Atendimento às exigências das comunidades.

Para fazer a associação de atributos e unidades de medida em cada sub-objetivo, propõe-se a utilização do Método da Utilidade Associada, de forma que as utilidades de cada atributo sejam medidas em uma única escala numérica. Nesse caso, 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). Sendo assim, a Tabela 3 apresenta os atributos e unidades resultantes:

**Tabela 3:** Utilidade Associada ao Objetivo *Stakeholders* Externos

ID	Objetivo	Atributo	Unidade
1.4.2	Assegurar projetos que atendam às expectativas de <i>stakeholders</i> externos		$U_p$
	- Atendimento às exigências ambientais	Normas ambientais	$u_{pj}$
	- Atendimento às exigências da ANTT	Compromissos ANTT	$u_{pj}$
	- Atendimento às exigências das comunidades	Compromissos comunidades	$u_{pj}$

Assim, a utilidade associada do objetivo *Stakeholders* Externos de cada projeto pode ser calculada pela fórmula:

$$U_p = \sum_{j=1}^J w_j u_{pj} \quad (5)$$

em que  $U_p$ : utilidade total do projeto p ( $p = 1, \dots, P$ );  
 $w_j$ : peso associado ao atributo j ( $j = 1, \dots, J$ ); e  
 $u_{pj}$ : utilidade do atributo j no projeto p.

### 3.2. Transformação dos Objetivos em Metas

A meta é obtida pela inclusão dos desvios negativos e positivos 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 metas de:

$$\text{Orçamento-}O \quad \left( \sum_{p=1}^P X_p C_p \right) + n_i - p_i = M_o \quad (6)$$

$$\text{Valor Presente Líquido-VPL} \quad \left( \sum_{p=1}^P X_p VPL_p \right) + n_i - p_i = M_{VPL} \quad (7)$$

$$\text{Disponibilidade Física-DF} \quad \left( \sum_{p=1}^P X_p DF_p \right) + n_i - p_i = M_{DF} \quad (8)$$

$$\text{Taxa de acidentes-AC} \quad \left( \sum_{p=1}^P X_p AC_p \right) + n_i - p_i = M_{AC} \quad (9)$$

$$\text{Atendimento aos stakeholders-U} \quad \left( \sum_{p=1}^P X_p U_p \right) + n_i - p_i = M_U \quad (10)$$

em que:

$X_p$ : variável binária (0 = Não; 1 = Sim) para seleção do projeto p ( $p = 1, \dots, P$ );

$n_i$ e $p_i$ :	variáveis de desvio negativo e positivo da meta $i$ ( $i = O, VPL, DF, AC$ ou $U$ );
$C_p$ :	investimento necessário para a execução do projeto $p$ [R\$];
$VPL_p$ :	Valor Presente Líquido do projeto $p$ [R\$];
$DF_p$ :	impacto na disponibilidade física da ferrovia causado pelo projeto $p$ [%];
$AC_p$ :	redução anual na taxa de acidentes da ferrovia causada pelo projeto $p$ [A/MTkm];
$U_p$ :	utilidade total do projeto $p$ ; e
$M_i$ :	valores alvo para cada uma das metas ( $i = O, VPL, DF, AC$ ou $U$ ).

### 3.3. Formulação do Modelo

Uma vez definidas as metas, propõe-se 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, de modo que os desvios sejam menores para as metas mais importantes. Assim, o modelo será composto pela função execução e metas definidas da seguinte forma:

$$\text{Min}z = \sum_{i=1}^I (u_i \frac{n_i}{M_i} + v_i \frac{p_i}{M_i}) \quad (11)$$

Sujeito a:

$$(\sum_{p=1}^P X_p C_p) + n_i - p_i = M_o \quad (12)$$

$$(\sum_{p=1}^P X_p VPL_p) + n_i - p_i = M_{VPL} \quad (13)$$

$$(\sum_{p=1}^P X_p DF_p) + n_i - p_i = M_{DF} \quad (14)$$

$$(\sum_{p=1}^P X_p AC_p) + n_i - p_i = M_{AC} \quad (15)$$

$$(\sum_{p=1}^P X_p U_p) + n_i - p_i = M_U \quad (16)$$

$$n_i, p_i \geq 0 \text{ para todo } I \quad (17)$$

$$M_i > 0 \text{ para todo } I \quad (18)$$

$$X_p \text{ devem ser binários} \quad (19)$$

$$0 < u_i < 10 \quad (20)$$

$$0 < v_i < 10 \quad (21)$$

em que:

$u_i$  e  $v_i$ : pesos dos desvios negativo e positivo da meta  $i$ .

### 4. APLICAÇÃO DO MODELO

O modelo para seleção de projetos de investimentos ferroviários será aplicado para a seleção de uma carteira de 15 projetos fictícios, utilizando o software *Microsoft Excel 2013*® com o suplemento *Solver*, conforme detalhado na Tabela 4.

Vale ressaltar que, de acordo com a estratégia do decisor, o orçamento disponível para a seleção da carteira de projetos é igual a R\$ 1.800 x 10<sup>6</sup> (aproximadamente 75% do Total) e que os valores alvo das demais metas serão iguais a 85% do valor total de cada atributo dos objetivos da carteira, conforme mostrado na Tabela 4. O orçamento será considerado uma meta e não uma restrição rígida para que o decisor possa trabalhar com diferentes *trade-offs* a partir de um potencial aumento do orçamento disponível.

O modelo de PM deverá indicar quais dos 15 projetos serão selecionados, buscando minimizar os desvios percentuais dos valores alvo por meta, a partir da variável de decisão  $X_i$ , que será: 1, se o projeto  $i$  for selecionado; 0, caso contrário.

Buscando analisar os diferentes *trade-offs*, a partir de eventuais alterações das prioridades dos objetivos realizadas pelo decisor, serão gerados diversos cenários para análise das carteiras de projetos selecionadas pelo modelo em cada uma dessas situações.

**Tabela 4:** Carteira de Projetos Ferroviários

Projeto	Seletor ( $X_i$ )	Investimento (R\$ $\times 10^6$ )	VPL (R\$ $\times 10^6$ )	DF (%)	Redução tx. ac. (A/MTKm)	Atendimento stakeholders (U)
1		207	2,557	0,206	0,000	3,000
2		132	0,477	0,218	0,075	2,333
3		180	1,942	0,436	0,009	2,000
4		199	2,145	0,515	0,005	3,667
5		120	0,921	0,060	0,011	3,667
6		156	1,868	0,988	0,000	3,000
7		153	0,612	0,735	0,001	2,667
8		189	2,952	0,272	0,015	2,667
9		128	0,444	0,220	0,031	1,667
10		180	0,710	0,778	0,010	3,333
11		165	0,037	0,007	0,000	2,000
12		150	2,298	0,197	0,059	3,667
13		174	2,324	0,487	0,008	2,333
14		105	1,240	0,429	0,022	3,000
15		180	0,533	0,057	0,004	2,333
<b>Total</b>		2.418	21,060	5,605	0,250	41,333
<b>Valor alvo</b>		1.800	17,901	4,764	0,212	35,133

Obs: VPL = Valor Presente Líquido e DF = Disponibilidade Física.

Para o Primeiro Cenário, de acordo com o planejamento estratégico da organização responsável pela ferrovia os objetivos contidos no modelo de seleção de projetos têm o seguinte nível de prioridade:

- Prioridade 1: Orçamento;
- Prioridade 2: VPL;
- Prioridade 3: Acidentes;
- Prioridade 4: Exigências *stakeholders*;
- Prioridade 5: DF.

Cabe ressaltar que o modelo irá compor a carteira de projetos levando em consideração que, quanto maior o valor dos pesos ( $v_i$  e  $u_i$ ) 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 percentuais dos valores alvo.

Assumindo essas premissas, para o Primeiro Cenário, o modelo selecionou 11 projetos dentre os 15 propostos, conforme apresentado na Tabela 5.

Analisando a Tabela 5, observa-se que o objetivo de orçamento foi o único com valor de  $v_i$

diferente de zero, enquanto que para os demais objetivos as variáveis  $u_i$  receberam valores positivos, uma vez que um estouro no orçamento disponível não seria aceitável pelo decisor, enquanto que para as demais metas, quanto maiores os valores alcançados melhor, mesmo que eventualmente ultrapassem os seus valores alvo.

**Tabela 5:** Resultado para o Primeiro Cenário

Objetivo	Valores			Desvios		Pesos	
	Alvo	Alcançado	Diferença	ni	pi	ui	vi
O	1.800,000	1.792,000	- 8,000	0,4%	0,0%	0	10
VPL	17,901	19,433	1,533	0,0%	8,6%	8	0
DF	4,764	4,586	- 0,179	3,7%	0,0%	2	0
AC	0,212	0,214	0,001	0,0%	0,7%	6	0
U	35,133	32,667	- 2,467	7,0%	0,0%	4	0
<b>Total</b>				<b>11,2%</b>	<b>9,2%</b>		

Obs: O = Orçamento, VPL = Valor Presente Líquido, DF = Disponibilidade Física, AC = Impacto na taxa de acidentes e U = Função Utilidade para atendimento às exigências dos *stakeholders*.

A soma ponderada dos desvios das metas (função objetivo) chegou a 35,6%, o que mostra que pode existir um desbalanceamento entre os pesos das variáveis de desvio, ou níveis de aspiração muito elevados para os valores alvos das algumas metas. Como era de se esperar, os objetivos de menor prioridade obtiveram desvios negativos em relação aos valores de suas metas e a soma desses desvios foi igual a 11,2%, com destaque para os desvios da meta de atendimento aos Stakeholders (7,0%) e de Disponibilidade Física (3,7%). Ressalta-se, ainda, que a meta do Valor Presente Líquido foi ultrapassada em 8,6%.

Em um Segundo Cenário, com a alteração da ordem de prioridade dos objetivos de redução da taxa de acidentes e atendimento às exigências dos *stakeholders*, passando os pesos das variáveis de seus desvios negativos para 4 e 6, respectivamente. A partir dessa alteração, o modelo selecionou novamente 11 projetos, porém, com alteração de um projeto em relação à situação inicial, apresentando função objetivo igual a 42,3% e os seguintes valores e desvios alcançados por objetivo:

**Tabela 6:** Resultado para o Segundo Cenário

Objetivo	Valores			Desvios		Pesos	
	Alvo	Alcançado	Diferença	ni	pi	ui	vi
O	1.800,000	1.765,000	- 35,000	1,9%	0,0%	0	10
VPL	17,901	18,104	0,203	0,0%	1,1%	8	0
DF	4,764	4,884	0,120	0,0%	2,5%	2	0
AC	0,212	0,206	- 0,006	2,9%	0,0%	4	0
U	35,133	33,333	- 1,800	5,1%	0,0%	6	0
<b>Total</b>				<b>10,0%</b>	<b>3,7%</b>		

Obs: O = Orçamento, VPL = Valor Presente Líquido, DF = Disponibilidade Física, AC = Impacto na taxa de acidentes e U = Função Utilidade para atendimento às exigências dos *stakeholders*.

Neste Segundo Cenário, o valor total da carteira selecionada foi R\$ 27 milhões menor que na anterior e a soma dos desvios negativos totalizou 10,0%, 1,2% menor que a situação anterior.

Se compararmos as somas dos desvios negativos entre os dois cenários, desconsiderando os desvios de orçamento, nota-se que houve uma redução de 2,7%, o que explica o aumento do desvio negativo da meta de orçamento. Além disso, para compensar essa redução, os desvios positivos das demais metas foram reduzidos de um total de 9,2% para 3,7%.

Segundo Ragsdale (2014), diferentes soluções de PM não podem ser comparadas simplesmente com base em seus valores de função objetivo. A alteração dos pesos das variáveis de desvio das metas influencia o resultado da função objetivo, de iteração para iteração, e comparar seus valores não é apropriado porque eles medem coisas diferentes. A função objetivo em um problema de PM serve para permitir que possíveis soluções sejam exploradas. Assim, deve-se comparar as soluções que são produzidas e não os valores da função objetivo.

Buscando avaliar o acréscimo necessário de orçamento para que os desvios negativos das metas fossem os menores possíveis, pode-se optar por um novo cenário, reduzindo a prioridade da meta de orçamento e mantendo a ordem de prioridade do primeiro cenário, que reflete as prioridades dos objetivos de acordo com o planejamento estratégico da organização. Vale ressaltar que o orçamento ainda é uma prioridade, porém menos importante, uma vez que o peso da sua variável de desvio recebeu o menor valor diferente de zero em relação às demais metas, conforme apresentado na Tabela 7.

Assim, para o Terceiro Cenário, o modelo selecionou 12 projetos, com um estouro de R\$ 93 milhões na meta de orçamento, porém com desvio negativo de apenas 0,4% na meta de atendimento às exigências dos *stakeholders* e com função objetivo igual a 12,6%. As demais metas tiveram desvios positivos, conforme apresentado na Tabela 7.

**Tabela 7:** Resultados para o Terceiro Cenário

Objetivo	Valores			Desvios		Pesos	
	Alvo	Alcançado	Diferença	ni	pi	ui	vi
O	1.800,000	1.893,000	93,000	0,0%	5,2%	0	2
VPL	17,901	18,548	0,647	0,0%	3,6%	10	0
DF	4,764	5,105	0,340	0,0%	7,1%	4	0
AC	0,212	0,237	0,025	0,0%	11,7%	8	0
U	35,133	35,000	- 0,133	0,4%	0,0%	6	0
<b>Total</b>				0,4%	27,6%		

Obs: O = Orçamento, VPL = Valor Presente Líquido, DF = Disponibilidade Física, AC = Impacto na taxa de acidentes e U = Função Utilidade para atendimento às exigências dos *stakeholders*.

**Tabela 8:** Resultados para o Quarto Cenário

Objetivo	Valores			Desvios		Pesos	
	Alvo	Alcançado	Diferença	ni	pi	ui	vi
O	1.800,000	2.083,000	283,000	0,0%	15,7%	0	0
VPL	17,901	18,059	0,158	0,0%	0,9%	10	0
DF	4,764	5,178	0,414	0,0%	8,7%	4	0
AC	0,212	0,219	0,006	0,0%	3,0%	8	0
U	35,133	36,667	1,533	0,0%	4,4%	6	0
<b>Total</b>				0,0%	32,7%		

Obs: O = Orçamento, VPL = Valor Presente Líquido, DF = Disponibilidade Física, AC = Impacto na taxa de acidentes e U = Função Utilidade para atendimento às exigências dos *stakeholders*.

Mesmo com a significativa redução dos desvios negativos, quanto seria necessário a mais de orçamento para que todos os desvios negativos fossem iguais a zero? Para avaliar esse *trade-off*, um novo cenário foi realizado, com os pesos das variáveis de desvio mantidos em relação à situação anterior, com exceção ao da variável de desvio positivo do orçamento, que passou de 2 para zero, mostrando que esse desvio deixou de ser uma prioridade e passou a ser indiferente para o decisor.

Nessas condições do Quarto Cenário, o modelo selecionou 13 projetos, com um estouro de R\$ 283 milhões na meta de orçamento, função objetivo igual a 0,0% e nenhum desvio negativo, conforme apresentado na Tabela 8.

## 5. ANÁLISE DOS RESULTADOS

No Primeiro Cenário, as prioridades foram definidas de acordo com o planejamento estratégico e com o orçamento disponível e a partir dos resultados alcançados foram invertidas as prioridades de dois objetivos para o Segundo Cenário, onde o modelo selecionou uma carteira com menores desvios negativos em relação às metas propostas, utilizando menos recursos em relação à situação anterior, ainda dentro do 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 o quanto a mais de orçamento seria necessário para a que não houvesse desvio negativo nas demais metas.

**Tabela 9:** Projetos Selecionados por Situação Avaliada

Projeto	C1	C2	C3	C4
1	●	●	●	
2	●	●	●	●
3	●			●
4	●	●	●	●
5	●	●	●	●
6	●	●	●	●
7		●	●	●
8	●	●	●	●
9			●	
10	●	●	●	●
11				●
12	●	●	●	●
13	●	●	●	●
14	●	●	●	●
15				●
Total	11	11	12	13
Objetivo	35,6%	42,3%	12,6%	0,0%

Obs: C1 a C4 apresentam os projetos selecionados nos Cenários de 1 a 4.

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. Deve ficar claro que não existe a melhor situação dentre as quatro apresentadas e que a escolha da melhor fica nas mãos do decisor, de acordo com suas necessidades e disponibilidades.

A relação dos projetos selecionados pelo modelo nas quatro situações avaliadas é apresentada na Tabela 9, indicando o total de projetos selecionadas e o valor obtido para a Função Objetivo.

A Figura 2 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.

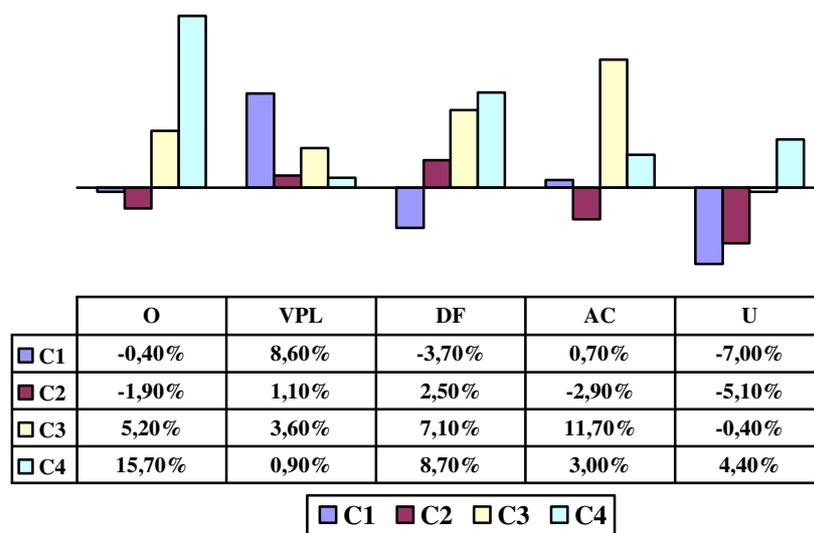


Figura 2: Desvios das Metas por Objetivo e Cenário. Obs: O = Orçamento, VPL = Valor Presente Líquido, DF = Disponibilidade Física, AC = Impacto na taxa de acidentes e U = Função Utilidade para atendimento às exigências dos stakeholders.

## 6. CONCLUSÃO

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.

A partir da metodologia da PM, foi desenvolvido um modelo de seleção de projetos de investimentos correntes ferroviários, buscando a composição da carteira de projetos com foco em indicadores estratégicos, financeiros e de sustentabilidade, que foi aplicado para a seleção de uma carteira de 15 projetos fictícios.

Buscando avaliar os *trade-offs* realizados com a alteração da prioridade dos objetivos, foram gerados 4 cenários de seleção da mesma carteira de projetos, variando os pesos das variáveis de desvios das metas, o que influencia diretamente no 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 seleção de projetos de investimentos, porém fica claro que ele é apenas uma ferramenta para auxiliar o tomador de decisão, que precisa definir quais as metas a serem priorizadas de acordo com as necessidades do negócio em questão. Os valores alvo de cada meta devem ser definidos de acordo com a estratégia da organização e a

mudança desses valores influenciam diretamente nos 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 o *software* utilizado se mostrou bastante amigável e adequado para a implementação do modelo, porém, este pode se mostrar limitado para aplicações mais robustas, a partir do aumento da complexidade do problema a ser modelado.

Uma atenção especial deve ser dada para os retornos que cada projeto irá alcançar frente aos objetivos, caso selecionados e implementados, uma vez que nessa etapa de seleção tratam-se de valores estimados pelo decisor ou pelos donos dos projetos. Muitas vezes essas informações são apresentadas em níveis baixos de maturidade e por isso é importante que exista uma etapa anterior de avaliação de maturidade dos projetos que irão concorrer na seleção pelo modelo. Dessa forma, os resultados alcançados pelo modelo devem servir como uma referência, não sendo a única fonte para tomada de decisão.

Fica como recomendação de desenvolvimento para futuros trabalhos a possibilidade de priorização dos projetos selecionados da carteira, ranqueando do melhor pontuado para o pior, de modo que o decisor possa analisar qual o projeto deverá ser cortado caso haja redução dos recursos disponíveis.

O modelo desenvolvido foi utilizado para selecionar projetos de investimentos ferroviários, porém poderia ser aplicado na seleção de projetos de outras naturezas, desde que os objetivos e valores alvo das metas fossem devidamente redefinidos.

## REFERÊNCIAS

- ANTT (2019) Características do modal ferroviário. Disponível em: <[http://www.antt.gov.br/cargas/arquivos\\_old/Ferrovio-rio.html](http://www.antt.gov.br/cargas/arquivos_old/Ferrovio-rio.html)>. (Acesso em: 16/04/2019).
- Ahern, A. e G. Anandarajah (2007) Railway projects prioritisation for investment: Application of goal programming. *Transport Policy Journal*, v. 14, n.1, p. 70-80. DOI: 10.1016/j.tranpol.2006.10.003.
- Ahern, A. e G. Anandarajah (2008) An optimisation model for prioritising transport projects. *Proceedings of ICE. Transport (Online)*, *Transport*, v. 161, n. 4, p. 221-230. DOI: 10.1680/tran.2008.161.4.221.
- Aouni, B.; C. Colapinto e D. La Torre (2014) Financial portfolio management through the goal programming model: Current state-of-the-art. *European Journal of Operational Research*, v. 234, n. 2, p. 536-545. DOI: 10.1016/j.ejor.2013.09.040.
- Brasil. Ministérios dos Transportes. (2016). *Descrição da malha ferroviária brasileira*. Disponível em: <http://www.transportes.gov.br/transporte-ferroviario.html>>. (Acesso em 16/01/2016).
- Colapinto, C.; R. Jayraman e S. Marsiglio (2015) Multi-criteria decision analysis with goal programming in engineering, management and social sciences: a state-of-the art review. *Annals of Operations Research*, 251 (1-2), p. 7-40, março. DOI: 10.1007/s10479-015-1829-1.
- Do Valle, A.; C. A. Soares; JR. J. Finocchio e L. Da Silva (2007) *Fundamentos do Gerenciamento de Projetos: 1a Edição*. FGV Editora.
- Kahraman, C. e G. Büyüközkan (2008) A combined fuzzy AHP and fuzzy goal programming approach for effective six-sigma project selection. *Journal of Multiple-valued Logic and Soft Computing*, v. 14, n. 6, p. 599-615.
- Margueron, M. V. (2003) *Processo de tomada de decisão sob incerteza em investimentos internacionais na exploração & produção de petróleo: uma abordagem multicritério*. Dissertação (mestrado). Curso de Pós-Graduação em Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. Disponível em: <<http://www.ppe.ufrj.br/index.php/pt/publicacoes/dissertacoes/2003/1144-processo-de-tomada-de-decisao-sob-incerteza-em-investimentos-internacionais-na-exploracao-producao-de-petroleo-uma-abordagem-multicriterio>> (Acesso em 16/04/2019).
- Ministério da Infraestrutura do Brasil (2019) Transporte ferroviário. Disponível em: <<http://www.transportes.gov.br/component/content/article/52-sistema-de-transportes/2849-transporte-ferroviario.html>>. (Acesso em 16/04/2019).
- Morais Neto, G. (1988) *Sistema Decisório Interativo de Alocação de Fluxo de Cargas*. Dissertação (mestrado). Curso de Pós-Graduação em Sistemas e Computação, Instituto Militar de Engenharia. Rio de Janeiro. Disponível em: <<http://transportes.ime.br/DISSERTAÇÕES.htm>> (Acesso em: 16/04/2019).
- Niemeier, D.; Z. Zabinsky; Z. Zeng e G. Rutherford (1995) Optimization models for transportation project programming process. *Journal of Transportation Engineering*, v. 121, n. 1. DOI: 10.1061/(asce)0733-947x(1995)121:1(14).

- Ramos, A. (1995) *Procedimento para tomada de decisão em terminais marítimos petroleiros*. Dissertação (mestrado). Curso de Pós-Graduação em Sistemas e Computação, Instituto Militar de Engenharia. Rio de Janeiro. Disponível em: <<http://bdex.eb.mil.br/jspui/handle/1/1006>> (acesso em 16/04/2019).
- Ragsdale, C. (2014) *Modelagem de Planilha e Análise de Decisão*. 7ª Edição. Cengage Learning.
- Tamiz, M. e D. Jones (1998) Goal programming for decision making: An overview of the current state-of-the-art. *European Journal of Operational Research*, v. 111, n. 3, p. 569-581. DOI: 10.1016/s0377-2217(97)00317-2.
- Tamiz, M. e D. Jones (2010) *Practical Goal Programming*. Springer Books.
- Teng, J. e G. Tzeng (1998) Transportation investment project selection using fuzzy multiobjective programming. *Fuzzy Sets and Systems*, v. 96, n.3, p. 259-280. DOI: 10.1016/s0165-0114(96)00330-2.
- Uliana, A. (2010) *Utilização de programação por metas como auxílio à tomada de decisão na distribuição de gás natural*. Dissertação (mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória. Disponível em: <[http://www.dominiopublico.gov.br/pesquisa/DetalheObraForm.do?select\\_action=&co\\_obra=182244](http://www.dominiopublico.gov.br/pesquisa/DetalheObraForm.do?select_action=&co_obra=182244)> (acesso em 16/04/2019).
- Vargas, R. (2010) 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.
- Wey, W. e K. Wu (2007) Using ANP priorities with goal programming in resource allocation in transportation. *Mathematical and Computer Modelling*, v. 46, n. 7-8, p. 985-1000. DOI: 10.1016/j.mcm.2007.03.017.
- Yang, X.; J. Low e L. Tang (2011) Analysis of intermodal freight from China to Indian Ocean: A goal programming approach. *Journal of Transport Geography*, v. 19, n. 4, p. 515-527. DOI: 10.1016/j.jtrangeo.2010.05.007.