

DISTRIBUIÇÃO DE SERVIÇOS ENTRE EMPRESAS DE TRANSPORTE POR ÔNIBUS

Renan A. L. Eccel, Sylvain M. R. Fournier, Eduardo Otte Hülse e Éder Vasco Pinheiro

WPLEX Software Ltda. Rod SC 401, 8600 Corporate Park bloco 5 sala 101. 88050-000 Santo Antônio de Lisboa, Florianópolis - SC

renan.eccel@wplex.com.br - sylvain@wplex.com.br - eduardo.hulse@wplex.com.br - eder.pinheiro@wplex.com.br

1 - Resumo

Os recentes contratos de concessão de **transporte de ônibus coletivo** de grandes e médias cidades brasileiras têm seguido a tendência de substituir os modelos que dividem o sistema de transporte em regiões operacionais por modelos integrados operados por um único **consórcio de empresas**. Dentro deste, cada empresa possui um **percentual de participação** que representa as suas responsabilidades de operação no sistema de transporte, e também sua remuneração final.

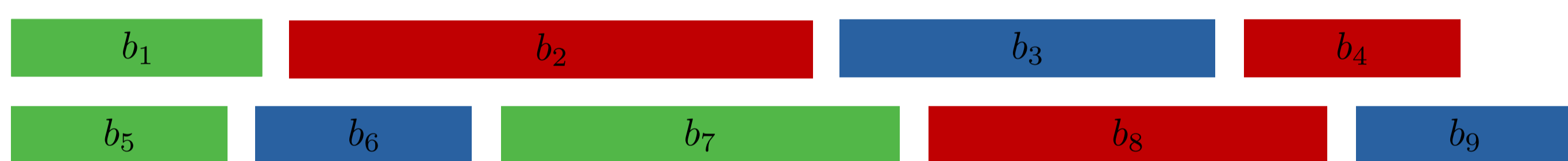
Para igualar a participação no custo à da remuneração, o consórcio precisa dividir as tarefas operacionais de maneira a respeitar os percentuais de participação das empresas, o que chamamos de **Problema de Distribuição de Serviços entre Empresas de Transporte por Ônibus**.

Para resolver esse problema, apresentamos neste trabalho um **modelo de programação linear inteiro misto**. E fazemos uma análise da aplicação do modelo para o **caso real** de uma cidade brasileira.

Este modelo está implementado em uma das funcionalidades do sistema **WPLEX-ON**, que auxilia o planejamento operacional de empresas de transporte coletivo por ônibus.

2 - Problema de distribuição de serviços entre empresas de transporte por ônibus

Dado um **conjunto de blocos de serviço**, em que cada um representa as tarefas dos tripulantes (motoristas e cobradores) e as viagens dos veículos operados por eles:



Em que, o **tamanho** do bloco representa o **custo** e a **cor** representa as características de **compatibilidade** do bloco.

Dado um **conjunto de empresas**, desejamos distribuir estes blocos entre elas de modo que o custo operacional de cada uma fique o mais próximo possível do valor de sua participação no consórcio.

● Empresa E1

42%

● Empresa E2

58%

Na solução apresentada abaixo, a **Empresa E1** recebeu 5 blocos, perfazendo uma participação de aproximadamente **45%**, superando em **3%** a participação ideal. A **Empresa E2**, por sua vez, recebeu 4 blocos perfazendo uma participação de **55%**, ficando **3%** aquém da ideal.

● Empresa E1

3%



● Empresa E2

3%



Entretanto, devido a questões operacionais, como a localização das garagens de cada empresa, o **custo de um bloco pode variar** de acordo com a empresa que foi alocada para operá-lo. Por isso, também é necessário **minimizar o custo total** de operação dos blocos, visto que não é de interesse do consórcio aumentar demasiadamente este valor.

Além disso, existem **duas restrições** a serem respeitadas. A primeira é uma relação de **compatibilidade entre bloco e empresa**, visto que nem toda empresa consegue operar um dado bloco. Já a segunda, **limita a quantidade de blocos** que uma empresa pode operar, de acordo com a **capacidade disponível** na empresa.

3 - Modelo de Programação Linear Inteiro Misto

$$\min k + \beta \sum_E z_e$$

→ **Custo total** e **erro absoluto total**

s.a.

$$\sum_B v_{bt} x_{be} \leq f_{et} \quad \forall (e, t) \in E \times T$$

→ Restrição de **frota** das empresas

$$x_{be} \leq a_{be} \quad \forall (b, e) \in B \times E$$

→ Restrição de **compatibilidade**

$$\sum_E x_{be} = 1 \quad \forall b \in B$$

→ Restrição de **particionamento**

$$\sum_B (c_{be} x_{be}) - p_e k \leq z_e \quad \forall e \in E$$

→ Cálculo do **erro absoluto**

$$\sum_B (-c_{be} x_{be}) + p_e k \leq z_e \quad \forall e \in E$$

→ Cálculo do **erro absoluto**

$$k = \sum_E \sum_B c_{be} x_{be}$$

→ **Custo total** de operação

$$x_{be} \in \{0, 1\}$$

$$\forall (b, e) \in B \times E$$

→ **Variáveis de decisão**

Em que:

E : **conjunto de empresas** do consórcio.

B : **conjunto de blocos** a serem particionados.

T : **conjunto de tecnologias**.

v_{bt} : valor binário que indica se o **tipo de veículo** t pode ser usado no **bloco** b .

f_{et} : **quantidade de veículos** do tipo t que a **empresa** e possui em sua frota.

a_{be} : valor binário que indica se o **bloco** b pode ser operado pela **empresa** e .

c_{be} : **custo do bloco** b caso seja alocado à **empresa** e .

p_e : **porcentagem de participação** da empresa e no consórcio.

β : **parâmetro** que balanceia os termos da **função objetivo**.

k : **custo total** de operação dos blocos.

z_e : **erro absoluto da empresa** e , calculado pela diferença entre o valor de participação da empresa e e o valor realmente alocado a essa empresa.

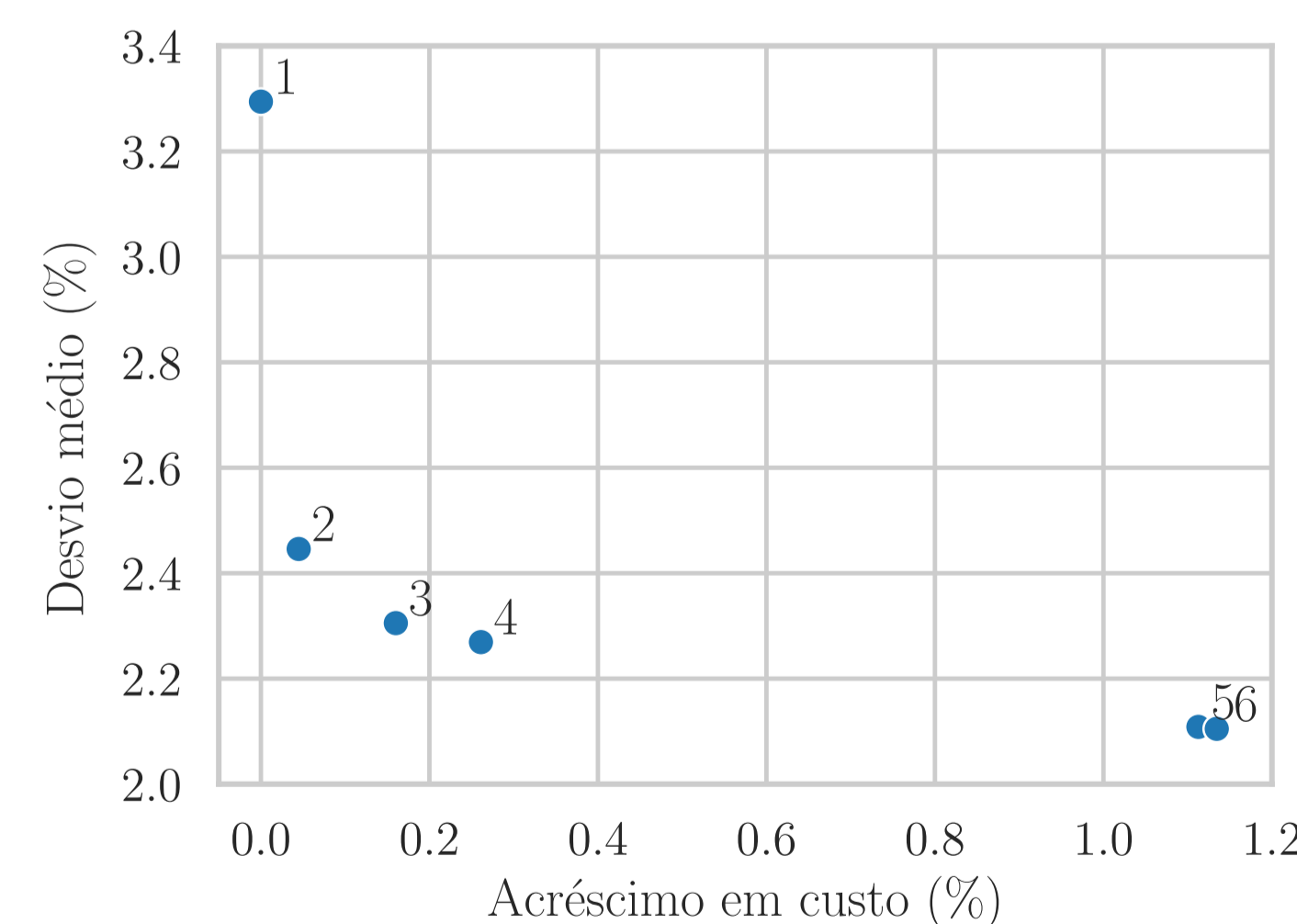
x_{be} : recebem **1** se o bloco for alocado à empresa, e **0** caso contrário.

4 - Estudo de caso real

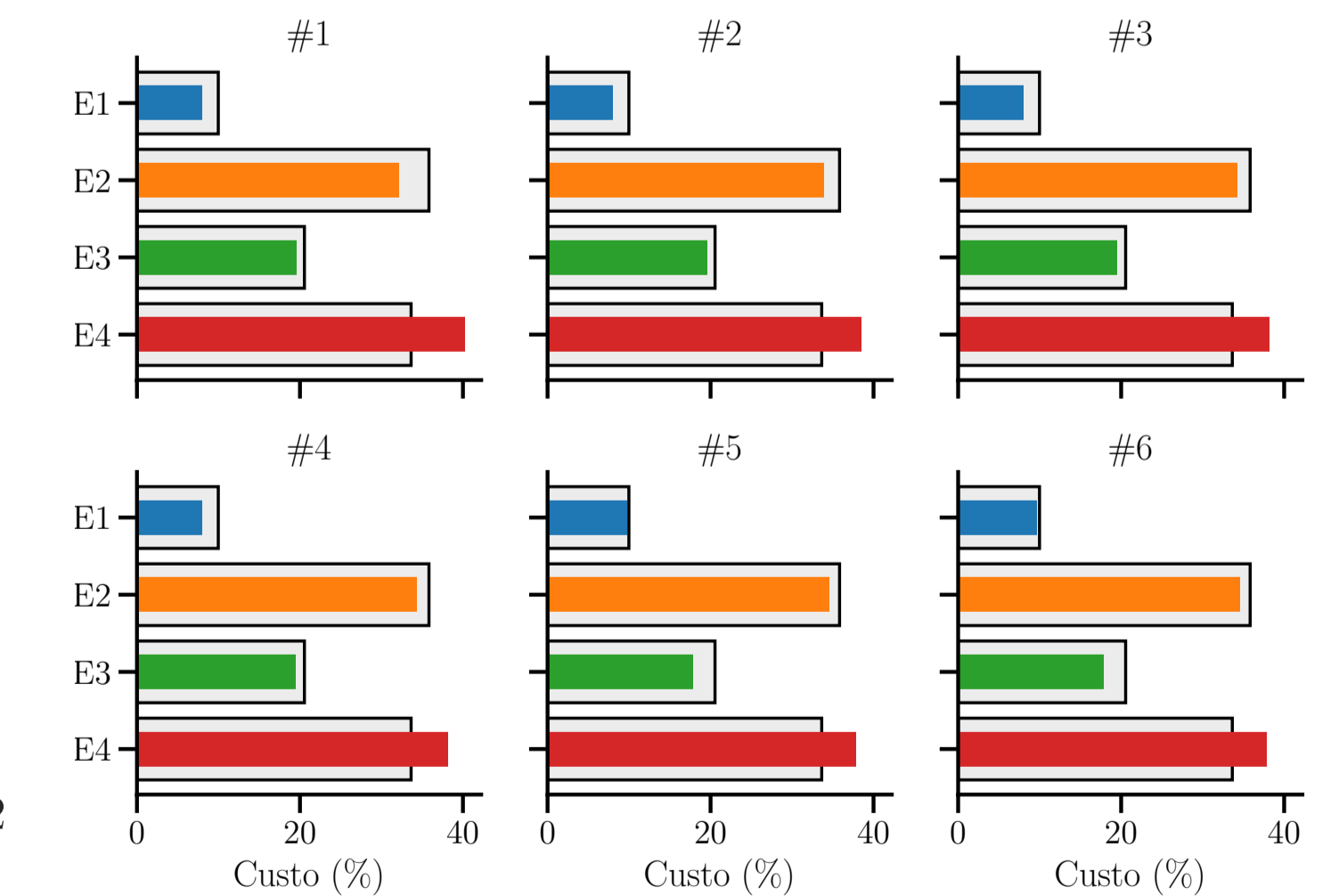
Realizamos um estudo em uma **instância real** de um consórcio com **quatro empresas** que opera 72 blocos em uma **cidade brasileira**. O modelo foi executado para valores de β variando entre 0 e 2 com incremento de 0,01.

À esquerda as soluções encontradas são apresentadas por dois indicadores de desempenho, o desvio médio percentual da participação das empresas e o acréscimo percentual em custo. Já à direita, temos o custo percentual alocado para cada uma das empresas representado pela barra colorida à frente e a porcentagem de participação representada pela barra cinza ao fundo.

Indicadores de qualidade das soluções



Soluções encontradas



As soluções encontradas apresentam uma característica em comum: em todas elas a empresa E4 ficou com uma participação de custo maior que a participação ideal, ao contrário das demais, que ficaram menores. Isso acontece por causa das restrições de frota dessas empresas.

#	β	Acréscimo em custo (%)	Desvio médio (%)	Desvio máximo (%)
1	0,00 a 0,01	0,00	3,29	6,59
2	0,02 a 0,20	0,04	2,45	4,89
3	0,21 a 0,74	0,16	2,31	4,61
4	0,75 a 1,48	0,26	2,27	4,54
5	1,49 a 1,67	1,11	2,11	4,22
6	1,68 a 2,00	1,13	2,11	4,21

Referências

- Boyd, Stephen P. e Lieven Vandenberghe (2004). *Convex optimization*. en. Cambridge, UK ; New York: Cambridge University Press. ISBN: 978-0-521-83378-3.
- Korf, Richard E (jul. de 2009). "Multi-Way Number Partitioning". en. Em: *IJCAI-09: Proceedings of the Twenty-First International Joint Conference on Artificial Intelligence*. Vol. 1. Pasadena, California, USA: AAAI Press, p. 6. ISBN: 978-1-57735-427-7. URL: <https://www.ijcai.org/proceedings/2009/> (acesso em 16/10/2018).
- Schreiber, Ethan L., Richard E. Korf e Michael D. Moffitt (jul. de 2018). "Optimal Multi-Way Number Partitioning". Em: *J. ACM* 65.4, 24:1–24:61. ISSN: 0004-5411. DOI: 10.1145/3184400. URL: <http://doi.acm.org/10.1145/3184400> (acesso em 16/10/2018).