



Bacharelado em Sistemas de Informação

Otimização de Rotas OSPF em Backbone de Telecomunicações

Uma Abordagem utilizando Programação Linear Inteira e LPSolve IDE

Acadêmico: Gustavo Maia
Disciplina: Pesquisa Operacional (6PES004)

São Bento do Sul - SC
25 de maio de 2026

1. Introdução.

No ambiente organizacional contemporâneo das operadoras de telecomunicações, o planejamento e o gerenciamento de capacidade de redes de longa distância (backbones) representam desafios críticos.

Tradicionalmente, protocolos de roteamento dinâmico como o OSPF utilizam métricas estáticas. Contudo, em cenários complexos de SLA de latência e redundância disjunta, a intuição cede lugar à modelagem matemática rigorosa.

Este trabalho preenche a lacuna entre a teoria matemática e a prática tecnológica usando Programação Linear através da ferramenta LPSolve IDE para encontrar as rotas ótimas.

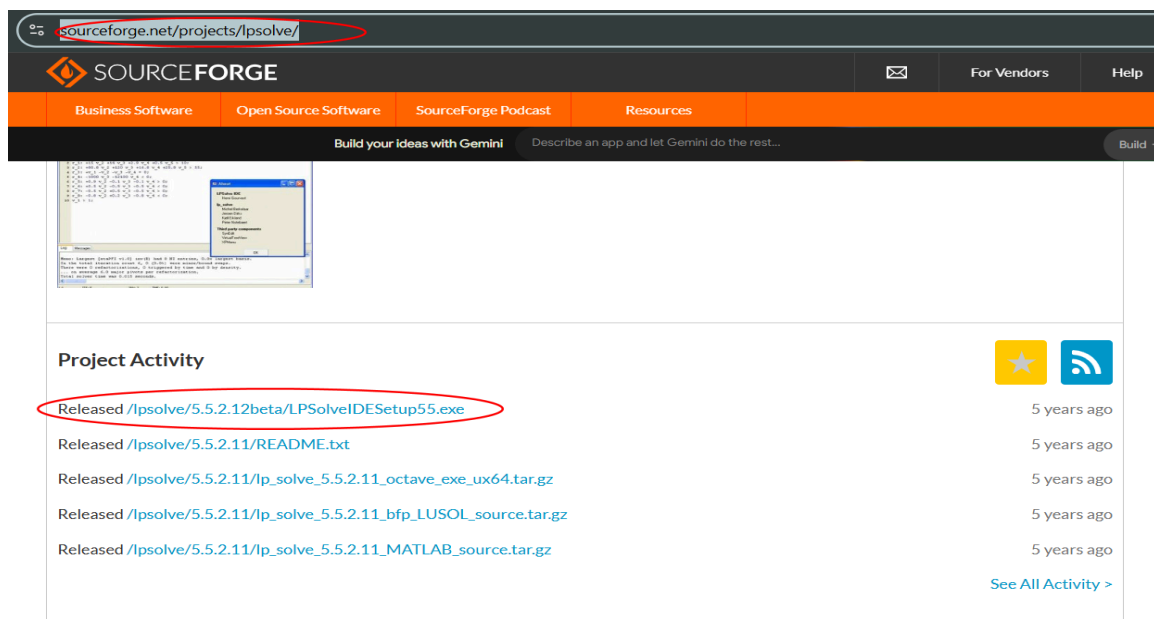
2. Fundamentação Teórica.

O Ipsolve é um solver de Programação Linear Inteira Mista de código aberto. Ele utiliza o método Simplex e Branch-and-Bound.

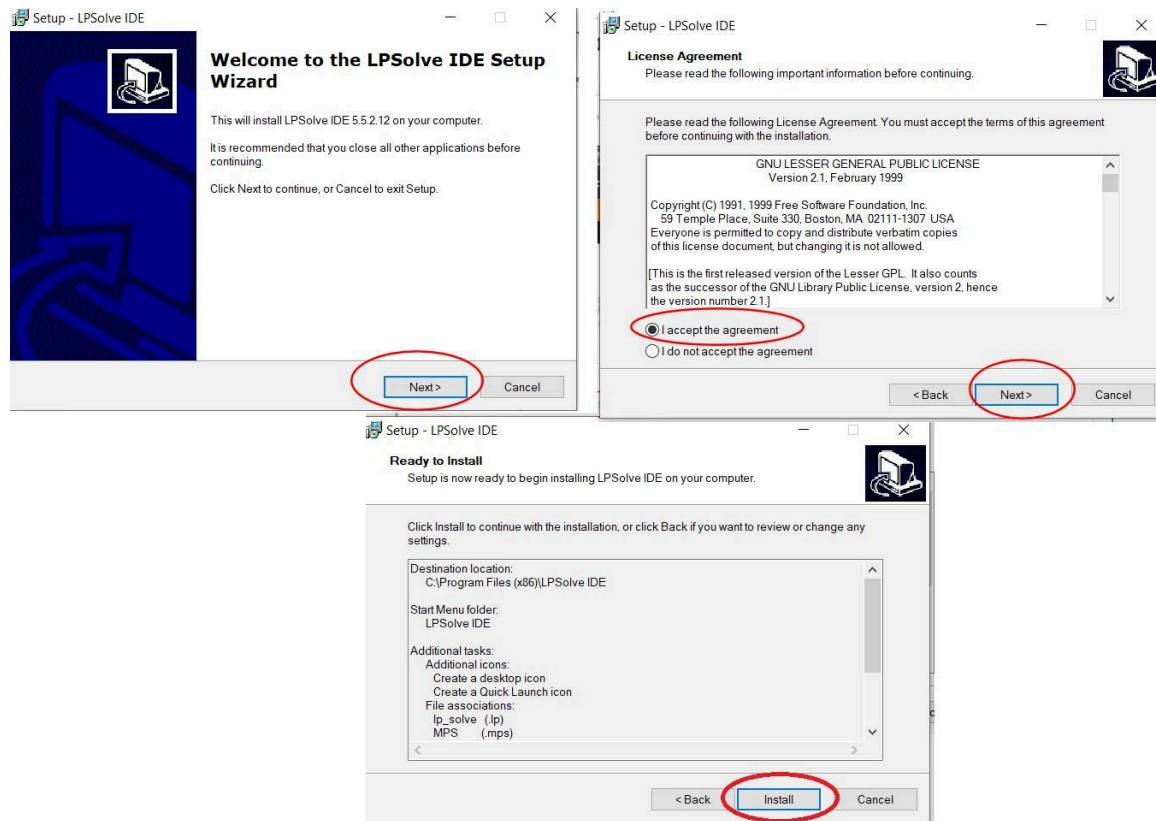
A versão IDE traz uma interface gráfica amigável onde o usuário pode descrever o modelo algebricamente de forma direta e visual.

3. Tutorial da Ferramenta Computacional (LPSolve IDE).

3.1. Faça download do LPSolve IDE em <https://sourceforge.net/projects/lpsolve/>.



3.2. Executar o instalador e concluir a instalação padrão do sistema.



3.4 Sintaxe Básica do LPSolve (Exemplo Didático Simples).

Para compreender o funcionamento básico da ferramenta, foi desenvolvido um exemplo didático envolvendo uma marcenaria responsável pela fabricação de mesas e cadeiras. O objetivo do problema consiste em maximizar o lucro diário da produção respeitando limitações operacionais de matéria-prima e mão de obra.

Cada mesa produzida gera lucro de R\$ 100, enquanto cada cadeira produzida gera lucro de R\$ 50. A fábrica possui disponibilidade máxima de 40 unidades de madeira e 50 horas de trabalho por dia. Além disso, existe uma restrição adicional que determina a produção mínima de cinco cadeiras diariamente para atender a demanda dos clientes.

A modelagem matemática do problema foi construída utilizando variáveis inteiras representando a quantidade de mesas e cadeiras produzidas. A variável x_1 representa a quantidade de mesas, enquanto a variável x_2 representa a quantidade de cadeiras.

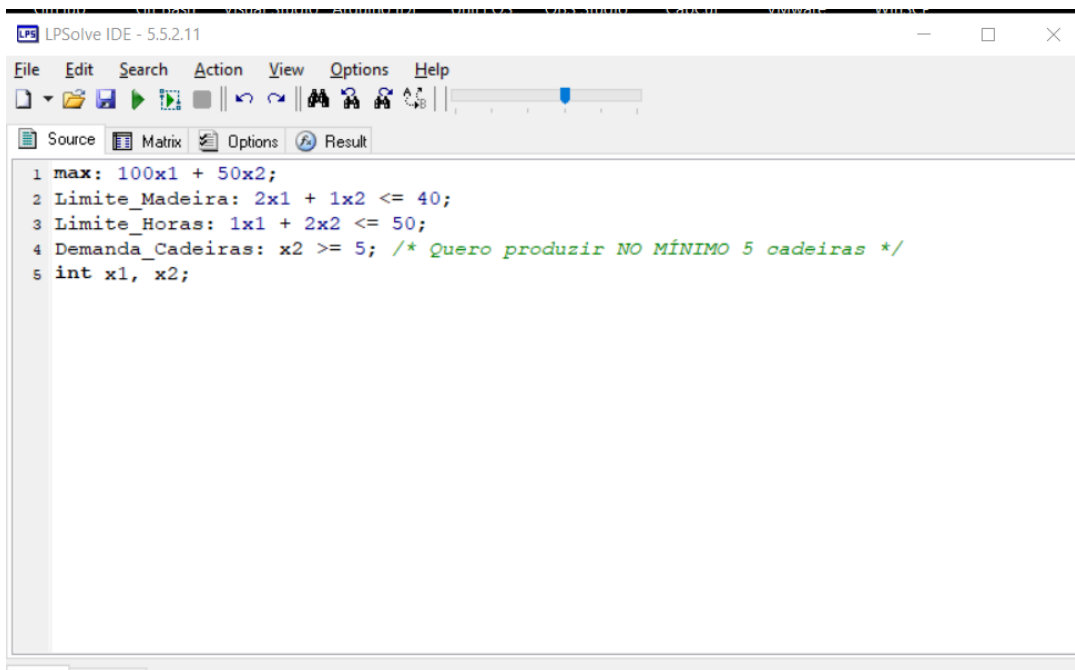
A função objetivo foi definida como a maximização do lucro total da produção:

A fábrica possui disponibilidade máxima de 40 unidades de madeira por dia. Cada mesa produzida consome 2 unidades de madeira, enquanto cada cadeira produzida consome 1 unidade. Dessa forma, o consumo total diário de matéria-prima. A fábrica também possui limitação de mão de obra, dispondo de no máximo 50 horas de trabalho por dia. Cada mesa

produzida consome 1 hora de trabalho, enquanto cada cadeira produzida consome 2 horas. Assim, a restrição de horas.

Além disso, o modelo estabelece que a produção mínima diária de cadeiras deve ser igual ou superior a cinco unidades:

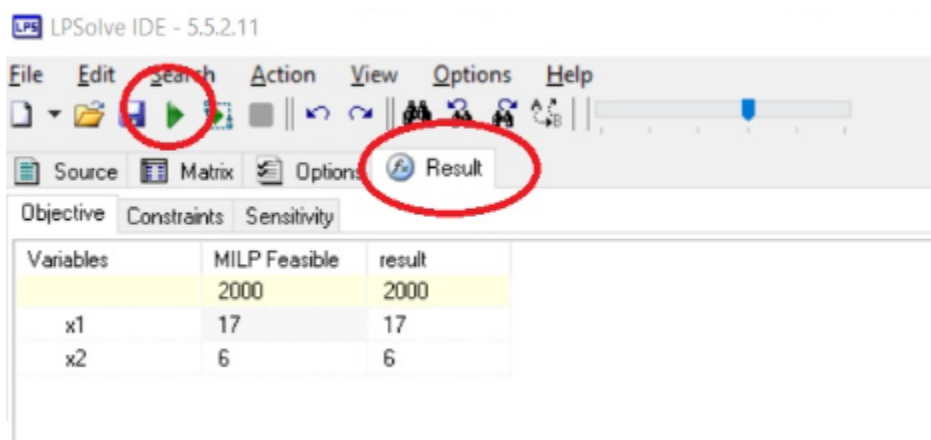
Agora, com essas informações modeladas, basta inserir as expressões no LPSolve IDE. Como o objetivo do problema é maximizar o lucro, iniciamos a modelagem utilizando o comando max: seguido da função objetivo. Em seguida, adicionamos as restrições operacionais e, por fim, definimos as variáveis inteiras através do comando int



```
1 max: 100x1 + 50x2;  
2 Limite_Madeira: 2x1 + 1x2 <= 40;  
3 Limite_Horas: 1x1 + 2x2 <= 50;  
4 Demanda_Cadeiras: x2 >= 5; /* Quero produzir NO MÍNIMO 5 cadeiras */  
5 int x1, x2;
```

Após isso apontamos no Run na parte superior da tela e podemos verificar o resultado na aba result:

3.5 Análise dos Resultados do Exemplo Didático.



Variables	MILP Feasible	result
	2000	2000
x1	17	17
x2	6	6

Após rodarmos o modelo no LPSolve, o resultado (Value of objective function: 2000.00) nos mostrou que o lucro máximo diário da marcenaria é de R\$ 2.000,00.

Para atingir esse teto, o software determinou que a produção ideal é de 17 mesas (x1) e 6 cadeiras (x2).

Essa combinação foi escolhida pelo solver por apresentar o maior lucro possível dentro das restrições estabelecidas pelo modelo matemático. Observa-se que a restrição de madeira tornou-se o principal fator limitante da produção, enquanto ainda permaneceu disponibilidade de horas de trabalho. .

4.Resolução do Problema Complexo.

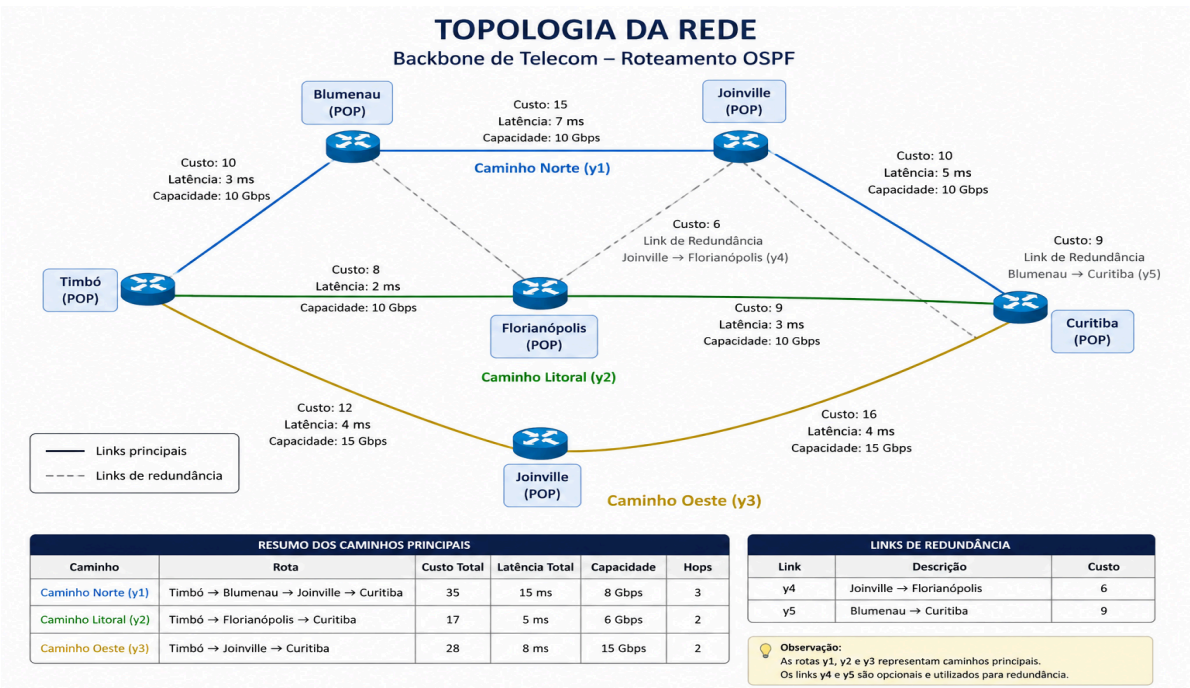
4.1 Descrição do Problema.

Uma operadora de telecomunicações possui um backbone regional responsável pelo transporte de tráfego entre diferentes POPs (*Points of Presence*) interligados através de enlaces de alta capacidade.

O objetivo da operadora consiste em determinar automaticamente a melhor rota entre o POP de origem em Timbó e o POP de destino em Curitiba utilizando conceitos de roteamento OSPF (*Open Shortest Path First*).

A topologia da rede foi estruturada com três possíveis caminhos principais para o tráfego, além de enlaces redundantes responsáveis por aumentar a disponibilidade operacional da infraestrutura.

Além das rotas principais, o modelo também considera enlaces redundantes auxiliares utilizados para aumentar a resiliência da rede em cenários de falha parcial da infraestrutura backbone.



4.2 Variáveis de Decisão.

As variáveis de decisão utilizadas no modelo são binárias. O valor 1 representa enlace ativado e o valor 0 representa enlace desativado.

As variáveis y_1 , y_2 e y_3 representam os caminhos principais da rede. Já as variáveis y_4 e y_5 representam enlaces redundantes utilizados para aumentar a resiliência física do backbone.

4.3 Dados Operacionais.

O Caminho Norte (y_1) apresenta custo OSPF igual a 35, latência de 15 ms, capacidade de 8 Gbps e 3 hops. O Caminho Litoral (y_2) possui custo 17, latência de 5 ms, capacidade de 6 Gbps e 2 hops. O Caminho Oeste (y_3) apresenta custo 28, latência de 8 ms, capacidade de 15 Gbps e 2 hops.

Os enlaces redundantes possuem custos adicionais de 6 e 9 unidades, respectivamente.

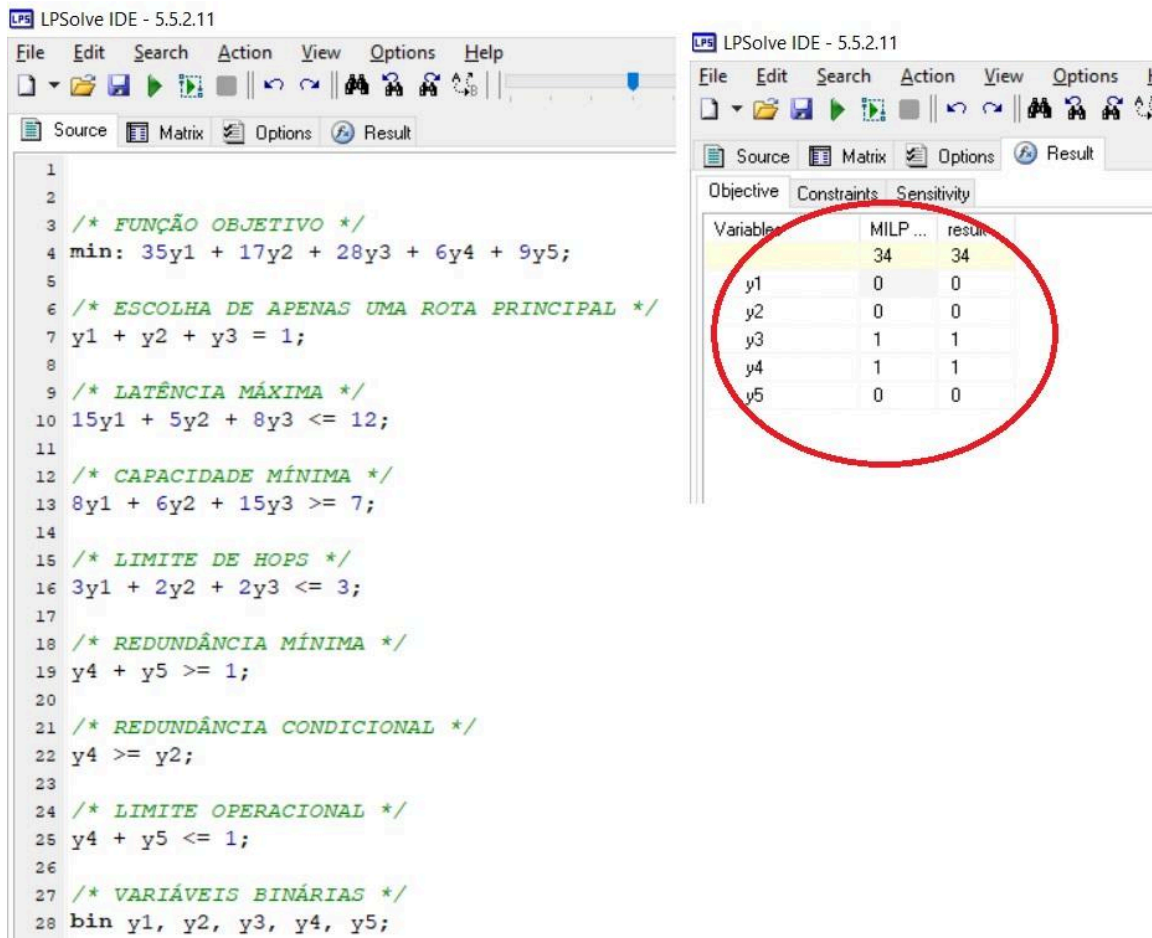
4.4 Função Objetivo.

O objetivo do modelo matemático consiste em encontrar a rota de menor custo operacional OSPF capaz de atender simultaneamente todas as restrições da rede.

4.5 Restrições do Modelo.

- A primeira restrição garante que apenas uma rota principal seja utilizada entre os POPs de Timbó e Curitiba. Dessa forma, o modelo impede a ativação simultânea de múltiplos caminhos principais, assegurando consistência operacional no roteamento do tráfego da rede.
- A segunda restrição estabelece que a latência total da rota selecionada não pode ultrapassar 12 ms.
- A terceira restrição determina que a rota escolhida deve suportar no mínimo 7 Gbps de tráfego agregado.
- A quarta restrição limita a quantidade máxima de hops da rota selecionada em até 3 saltos.
- A quinta restrição estabelece que pelo menos um enlace redundante deve permanecer ativo
- A sexta restrição determina que, caso o caminho litoral seja utilizado, o link redundante Joinville → Florianópolis deve ser ativado.
- A sétima restrição limita a quantidade total de enlaces redundantes ativos simultaneamente.

4.6 Modelo Implementado no LPSolve IDE.



The left screenshot shows the LPSolve IDE interface with the 'Source' tab selected. The code defines a linear programming model with the following components:

- Objective Function:** $\min: 35y_1 + 17y_2 + 28y_3 + 6y_4 + 9y_5;$
- Constraint 1:** $y_1 + y_2 + y_3 = 1;$ (ESCOLHA DE APENAS UMA ROTA PRINCIPAL)
- Constraint 2:** $15y_1 + 5y_2 + 8y_3 \leq 12;$ (LATÊNCIA MÁXIMA)
- Constraint 3:** $8y_1 + 6y_2 + 15y_3 \geq 7;$ (CAPACIDADE MÍNIMA)
- Constraint 4:** $3y_1 + 2y_2 + 2y_3 \leq 3;$ (LIMITE DE HOPS)
- Constraint 5:** $y_4 + y_5 \geq 1;$ (REDUNDÂNCIA MÍNIMA)
- Constraint 6:** $y_4 \geq y_2;$ (REDUNDÂNCIA CONDICIONAL)
- Constraint 7:** $y_4 + y_5 \leq 1;$ (LIMITE OPERACIONAL)
- Variable Types:** $\text{bin } y_1, y_2, y_3, y_4, y_5;$ (VARIÁVEIS BINÁRIAS)

The right screenshot shows the 'Result' tab with a table of variable values. The first row (Objective) is circled in red.

Variable	MILP ...	result
	34	34
y1	0	0
y2	0	0
y3	1	1
y4	1	1
y5	0	0

4.7 Análise Crítica da Solução Ótima.

A solução encontrada atende simultaneamente todos os critérios operacionais definidos no modelo matemático. O caminho selecionado respeita as restrições de capacidade mínima, limitação de hops e redundância física da infraestrutura.

A solução ótima encontrada respeitou integralmente o SLA máximo de latência definido no modelo matemático, mantendo a rota selecionada dentro do limite operacional de 12 ms estabelecido pela operadora.

degradações ocasionais de enlace. Além disso, a ativação do enlace redundante garante maior disponibilidade operacional do backbone, reduzindo impactos decorrentes de falhas isoladas e aumentando a resiliência física da topologia.

5. Discussão da Solução Ótima e Gargalos das Restrições

Após a execução do modelo matemático no LPSolve IDE, o solver encontrou como solução ótima a ativação do Caminho Oeste (y3) juntamente com o enlace redundante Joinville → Florianópolis (y4). O resultado obtido apresentou custo total igual a 34, representando a solução de menor custo capaz de atender simultaneamente todas as restrições operacionais impostas ao backbone da operadora.

A escolha do Caminho Oeste ocorreu porque essa rota foi a única capaz de satisfazer integralmente os requisitos de latência, capacidade mínima de tráfego e limitação de hops estabelecidos no modelo. Embora o Caminho Litoral apresentasse menor custo OSPF e menor latência, sua capacidade máxima de 6 Gbps tornou-se insuficiente diante da exigência mínima de 7 Gbps definida para o backbone. Dessa forma, o solver descartou automaticamente essa alternativa durante o processo de otimização.

O Caminho Norte também se tornou inviável devido ao descumprimento da restrição de SLA de latência. Como a rota possuía latência total de 15 ms e o modelo estabelecia limite máximo de 12 ms, o solver eliminou essa possibilidade ainda nas primeiras etapas da resolução.

Além disso, observou-se que a restrição de redundância exerceu influência direta na solução final encontrada. O modelo exigia que pelo menos um enlace redundante permanecesse ativo, aumentando a disponibilidade operacional e a tolerância a falhas da infraestrutura. Em função disso, o enlace redundante Joinville → Florianópolis foi ativado por apresentar menor custo adicional em comparação ao segundo enlace redundante disponível.

Outro ponto importante foi a restrição de disjunção operacional dos enlaces redundantes, que impediu a ativação simultânea de múltiplos links de backup. Essa limitação reduziu custos operacionais e evitou aumento desnecessário da complexidade da infraestrutura backbone.

Os resultados demonstram que as restrições do modelo tiveram papel fundamental no processo de tomada de decisão do solver. O problema evidenciou como técnicas de Programação Linear Inteira podem ser utilizadas para representar cenários reais de engenharia de redes, permitindo selecionar automaticamente soluções ótimas considerando simultaneamente custo, desempenho, disponibilidade e resiliência operacional.

6. Conclusão.

A aplicação da Programação Linear Inteira demonstrou elevada eficiência na resolução de problemas complexos de engenharia de redes e telecomunicações.

Através da modelagem matemática realizada no LPSolve IDE, foi possível determinar automaticamente a melhor rota OSPF para o backbone da operadora considerando simultaneamente critérios de custo, latência, capacidade e redundância.

Os resultados obtidos demonstram como técnicas de Pesquisa Operacional podem ser utilizadas diretamente no planejamento de infraestrutura de telecomunicações, contribuindo para redução de custos operacionais, aumento da confiabilidade da rede e melhoria dos níveis de SLA oferecidos aos clientes.

Além disso, o trabalho evidenciou a importância da utilização de restrições de disjunção de caminhos como mecanismo de aumento da resiliência física do backbone, reduzindo os impactos decorrentes de falhas simultâneas na infraestrutura.

7. Referências.

HILLIER, Frederick S.; LIEBERMAN, Gerald J. Introdução à Pesquisa Operacional. 10. ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.

TAHA, Hamdy A. Pesquisa Operacional. 8. ed. São Paulo: Pearson, 2008.

RFC 2328 – OSPF Version 2. Internet Engineering Task Force (IETF).

LPSOLVE. LP Solve Linear Programming Solver. Disponível em:

[LP Solve Official Website](http://lpsolve.sourceforge.net/5.5/)

Acesso em: 25 maio 2026.