

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS  
ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA, MECÂNICA E DE  
COMPUTAÇÃO**

**BRUNO QUIRINO DE OLIVEIRA**

**Programação Inteira Binária com Técnicas  
Bio-Inspiradas para o Planejamento Otimizado  
de Redes de Transporte Ópticas**

Goiânia  
2020



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS  
ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA, MECÂNICA E DE COMPUTAÇÃO

## TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO (TECA) PARA DISPONIBILIZAR VERSÕES ELETRÔNICAS DE TESES

### E DISSERTAÇÕES NA BIBLIOTECA DIGITAL DA UFG

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações (BDTD/UFG), regulamentada pela Resolução CEPEC nº 832/2007, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a [Lei 9.610/98](#), o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou download, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

O conteúdo das Teses e Dissertações disponibilizado na BDTD/UFG é de responsabilidade exclusiva do autor. Ao encaminhar o produto final, o autor(a) e o(a) orientador(a) firmam o compromisso de que o trabalho não contém nenhuma violação de quaisquer direitos autorais ou outro direito de terceiros.

#### 1. Identificação do material bibliográfico

Dissertação       Tese

#### 2. Nome completo do autor

Bruno Quirino de Oliveira

#### 3. Título do trabalho

**“Programação Inteira Binária com Técnicas Bio-Inspiradas para o Planejamento Otimizado de Redes de Transporte Ópticas”**

#### 4. Informações de acesso ao documento (este campo deve ser preenchido pelo orientador)

Concorda com a liberação total do documento  SIM       NÃO<sup>1</sup>

[1] Neste caso o documento será embargado por até um ano a partir da data de defesa. Após esse período, a possível disponibilização ocorrerá apenas mediante:

**a)** consulta ao(à) autor(a) e ao(à) orientador(a);

**b)** novo Termo de Ciência e de Autorização (TECA) assinado e inserido no arquivo da tese ou dissertação.

O documento não será disponibilizado durante o período de embargo.

Casos de embargo:

- Solicitação de registro de patente;
- Submissão de artigo em revista científica;
- Publicação como capítulo de livro;
- Publicação da dissertação/tese em livro.

**Obs. Este termo deverá ser assinado no SEI pelo orientador e pelo autor.**



**Magistério Superior**, em 20/10/2020, às 16:40, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).

---



Documento assinado eletronicamente por **BRUNO QUIRINO DE OLIVEIRA, Discente**, em 20/10/2020, às 17:31, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).

---



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://sei.ufg.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **1626800** e o código CRC **E3892CF6**.

---

**BRUNO QUIRINO DE OLIVEIRA**

# Programação Inteira Binária com Técnicas Bio-Inspiradas para o Planejamento Otimizado de Redes de Transporte Ópticas

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação da Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação da Universidade Federal de Goiás, como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica e de Computação.  
Área de concentração: Engenharia de Computação.  
Orientador: Prof. Dr. Flávio Henrique Teles Vieira.

Goiânia  
2020

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UFG.

Oliveira, Bruno Quirino de  
Programação Inteira Binária com Técnicas Bio-Inspiradas para o Planejamento Otimizado de Redes de Transporte Ópticas [manuscrito] / Bruno Quirino de Oliveira. - 2020.  
CXLV, 145 f.: il.

Orientador: Prof. Dr. Flávio Henrique Teles Vieira.  
Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação (EMC), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação, Goiânia, 2020.  
Bibliografia. Anexos.  
Inclui siglas, gráfico, tabelas, algoritmos, lista de figuras, lista de tabelas.

1. Modelos de Otimização. 2. Redes de Transporte Ópticas. 3. Sistemas Fuzzy. 4. Algoritmo Genético. 5. Algoritmo Firefly. I. Vieira, Flávio Henrique Teles, orient. II. Título.

CDU 621.3



## UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS

## ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA, MECÂNICA E DE COMPUTAÇÃO

## ATA DE DEFESA DE TESE

Ata Nº **05/2020** da sessão de Defesa de Tese de Bruno Quirino de Oliveira que confere o título de Doutor em **Engenharia Elétrica e de Computação**, na área de concentração em **Engenharia de Computação**.

Aos vinte e cinco dias do mês de agosto de dois mil e vinte, a partir das 14h00min, realizou-se a sessão pública de Defesa de Tese intitulada “**Programação Inteira Binária com Técnicas Bio-Inspiradas para o Planejamento Otimizado de Redes de Transporte Ópticas**”. Os trabalhos foram instalados pelo Orientador, Professor Doutor Flávio Henrique Teles Vieira (EMC/UFG), com a participação dos demais membros da Banca Examinadora: Professor Doutor Marcos Antônio de Sousa (PUC-GO), membro titular externo, Professora Doutora Maria José Pereira Dantas (PUC-GO), membro titular externo, Professor Doutor Alisson Assis Cardoso (IFG Anápolis) membro titular externo e Professor Doutor Flávio Geraldo Coelho Rocha (EMC/UFG) membro titular interno. A banca aconteceu por videoconferência. Durante a arguição os membros da banca **não fizeram** sugestão de alteração do título do trabalho. A Banca Examinadora reuniu-se em sessão secreta a fim de concluir o julgamento da Dissertação, tendo sido o candidato **aprovado** pelos seus membros. Proclamados os resultados pelo Professor Doutor Flávio Henrique Teles Vieira, Presidente da Banca Examinadora, foram encerrados os trabalhos e, para constar, lavrou-se a presente ata que é assinada pelos Membros da Banca Examinadora, aos vinte e cinco dias do mês de agosto de dois mil e vinte.

## TÍTULO SUGERIDO PELA BANCA



Documento assinado eletronicamente por **Flávio Geraldo Coelho Rocha, Professor do Magistério Superior**, em 25/08/2020, às 17:28, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Flavio Henrique Teles Vieira, Professor do Magistério Superior**, em 25/08/2020, às 17:28, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Marcos Antônio De Sousa, Professor do Magistério Superior**, em 25/08/2020, às 17:45, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **ALISSON ASSIS CARDOSO, Usuário Externo**, em 26/08/2020, às 15:31, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Maria José Pereira Dantas, Usuário Externo**, em 11/09/2020, às 18:30, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site

[https://sei.ufg.br/sei/controlador\\_externo.php?](https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0)

[acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **1493231** e o código CRC **01895676**.

---

**Referência:** Processo nº 23070.034045/2020-10

SEI nº 1493231

*“Conheço muitos que não puderam quando deviam porque não quiseram quando podiam”.*

François Rabelais

*A todas as pessoas que me acolheram de alguma forma. Minha esposa e meus pais que abdicaram da minha presença em vários momentos. A eles dedico este nosso trabalho.*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço em primeiro lugar os meus pais, que me deram a oportunidade de seguir nos estudos sempre me apoiando nas decisões tomadas. Agradeço também, a minha esposa Janaina, que de forma especial e carinhosa me deu força e coragem, me apoiando em todos os momentos durante o trabalho. Ao orientador professor doutor Flávio Henrique Teles Vieira e ao amigo professor doutor Marcos Antônio de Sousa que se disponibilizaram para execução da tarefa de orientação da pesquisa e me ajudaram incessantemente em todos os passos do projeto, trazendo ensinamentos não só para vida acadêmica e profissional de engenharia, mas também para a vida social e humana. Enfim, quero demonstrar o meu agradecimento, a todos aqueles que, de um modo ou de outro, tornaram possível a realização da presente tese.

## RESUMO

Nos sistemas de telecomunicações, o tráfego de dados continua crescendo a uma alta velocidade, sendo que o aumento tanto na quantidade de serviços oferecidos quanto na taxa de transmissão requerida são os responsáveis por este cenário. Claramente, este crescimento no tráfego de dados está promovendo sérios desafios para as redes de transporte óptica em termos de melhorar sua eficiência de capacidade, a fim de atender os novos requisitos de tráfego. Este trabalho apresenta modelos de otimização para o dimensionamento de redes ópticas de transporte. É considerado o problema de planejamento de rede óptica em que é especificada uma matriz de interesse de tráfego entre os nós de demanda. Esta matriz de interesse de tráfego pode ser modelada em termos de taxa de transmissão requerida ou pela quantidade de canais necessários de um serviço modular padronizado. A rede de transporte óptica é modelada como um grafo, através da abordagem arco-caminho. Modelos de programação linear inteira (ILP) e programação linear inteira mista (MILP) com variáveis 0-1 são desenvolvidos com orientação para minimização de custos. Restrições de garantia de atendimento de demanda, de especificidades de capacidade técnica de equipamentos e de exclusividade na alocação de modularidade de enlace de transmissão também são contempladas. Com o objetivo de assegurar sistemas de apoio à decisão mais flexíveis e realistas quanto aos cenários de aplicação que pretendem retratar, técnicas de inteligência artificial, tais como lógica *fuzzy*, algoritmos genéticos e *firefly*, são incorporadas aos processos de modelagem e resolução dos modelos. Nesse sentido, um método de otimização Híbrido *Firefly*-Genético (HFA) é utilizado para resolver o problema ILP, para o planejamento da rede de transporte óptica (OTN), considerando a minimização de custos. O método combina o algoritmo discreto *Firefly* (FA) com o algoritmo genético padrão (GA). Resultados computacionais de cenários que contemplam: redes de médio e grande porte, diferentes tecnologias de transmissão óptica e diversidades de matrizes de tráfego são apresentados e discutidos. Os resultados alcançados são animadores com destaque para a facilidade de adaptação das modelagens MILP e ILP para atender novos requisitos e/ou especificidades de rede e tecnologia a serem avaliadas.

### **Palavra-chave**

Modelos de Otimização, Redes de Transporte Ópticas, Sistemas *Fuzzy*, Algoritmo Genético e Algoritmo *Firefly*.

## **ABSTRACT**

In telecommunications systems, data traffic continues to grow at a high speed, and the increase in both the amount of services offered and the required transmission rate are responsible for this scenario. Clearly, this growth in data traffic is posing serious challenges for optical transport networks in terms of improving their capacity efficiency in order to meet new traffic requirements. This work presents optimization models for the design of optical transport networks. The optical network planning problem is considered, in which a traffic interest matrix between demand nodes is specified. This traffic interest matrix can be modeled in terms of the required transmission rate or the number of channels required for a standardized modular service. The optical transport network is modeled as a graph, using the arc-path approach. Models of integer linear programming (ILP) and mixed integer linear programming (MILP) with variables 0-1 are developed with guidance to minimize costs. Restrictions on guaranteeing demand compliance, specific technical capacity of equipment and exclusivity in the allocation of transmission link modularity are also contemplated. In order to ensure more flexible and realistic decision support systems regarding the application scenarios they intend to portray, artificial intelligence techniques, such as fuzzy logic, genetic algorithms and firefly, are incorporated into the modeling and resolution processes of the models. In this sense, a Hybrid Firefly-Genetic (HFA) optimization method is used to solve the ILP problem, for the planning of the optical transport network (OTN), considering cost minimization. The method combines the Firefly discrete algorithm (FA) with the standard genetic algorithm (GA). Computational results of scenarios that contemplate: medium and large networks, different optical transmission technologies and diversity of traffic matrices are presented and discussed. The results achieved are encouraging, with emphasis on the ease of adapting the MILP and ILP models to meet new requirements and/or specificities of the network and technology to be evaluated.

### **Keywords**

Optimization Models, Optical Transport Networks, Fuzzy Systems, Genetic Algorithm and Firefly Algorithm.

## ARTIGOS ACEITOS E SUBMETIDOS

### Artigos em Periódicos:

B. Q. DeOliveira, M. A. DeSousa e F. H. T. Vieira, “Firefly Algorithm Based Optimization Model for Planning of Optical Transport Networks,” *Advances in Electrical and Computer Engineering*, v. 20, p. 55-64, 2020.

B. Q. DeOliveira, M. A. DeSousa e F. H. T. Vieira, “A Hybrid Firefly-Genetic Algorithm for Planning of Optical Transport Networks,” *Journal of Communication and Information Systems*, v. 35, p. 243-255, 2020.

### Artigos em Congressos:

B. Q. DeOliveira, V. H. Cunha, L. C Guimarães, H. V. S. T. Junior, F. H. T. Vieira e M. A. DeSousa, “Planejamento Otimizado de Redes de Transporte Ópticas Utilizando Técnica de Inteligência Artificial,” *Escola Regional de Informática de Goiás (ERI-GO)*, 2019.

B. Q. DeOliveira, V. H. Cunha, L. C Guimarães, H. V. S. T. Junior, F. H. T. Vieira e M. A. DeSousa, “Modelo de Programação Linear Inteira Mista Aplicado ao Planejamento de Redes de Transporte OTN,” *15º Congresso de Pesquisa, Ensino e Extensão (Conpeex)*, 2018.

B. Q. DeOliveira, V. H. Cunha, L. C Guimarães, H. V. S. T. Junior, F. H. T. Vieira e M. A. DeSousa, “Sistema de Apoio á Decisão para o Planejamento Otimizado de Redes de Transporte Ópticas,” *XVI Conferência de Estudos em Engenharia Elétrica*, 2018.

B. Q. DeOliveira, V. H. Cunha, L. C Guimarães, H. V. S. T. Junior e F. H. T. V. “Aplicação de um Modelo de Otimização MILP-Fuzzy para o Dimensionamento de Redes de Transporte Ópticas,” *XXXVIII Encontro Nacional de Engenharia de Produção*, 2018.

B. Q. DeOliveira, V. H. Cunha, L. C Guimarães, H. V. S. T. Junior, F. H. T. Vieira e M. A. DeSousa, “Optimized planning of optical transport networks using artificial intelligence techniques,” *IEEE International Conference on Automation (IEEE ICA)*, 2018. Aceito para Publicação.

B. Q. DeOliveira, V. H. Cunha, L. C Guimarães, H. V. S. T. Junior, F. H. T. Vieira e M. A. DeSousa, “Sistema de Apoio à Decisão para o Planejamento Otimizado de Redes de Transporte Ópticas,” *L Simposio Brasileiro de Pesquisa Operacional*, 2018. Aceito para Publicação.

E. Campos, V. H. Cunha, M. J. P. Dantas, L. C. Guimarães, C. A. Lima e B. Q. DeOliveira, “Network Design Genetic Algorithm (NDGA) Aplicado em Redes de Telecomunicações,” *4ª Conferência Ibero-Americana Computação Aplicada - Lisboa, Portugal*, 2016.

M. A. DeSousa, B. Q. DeOliveira, M. J. P. Dantas, A. Santana e F. Bragança, “Modelagem de um sistema de apoio à decisão para a seleção de serviços de telecomunicações,” *Conferência Ibero-Americana Computação Aplicada, Porto-Portugal*, 2014.

# SUMÁRIO

Lista de Figuras .....	13
Lista de Tabelas .....	15
Lista de Abreviaturas.....	17
Capítulo 1. Introdução.....	19
1.1 Contribuições do Trabalho .....	24
1.2 Organização da Tese.....	26
Capítulo 2. Fundamentação Teórica.....	28
2.1 Sistemas de Telecomunicações .....	28
2.2 Redes de Transportes Ópticas.....	31
2.2.1 Rede de Transporte PDH.....	31
2.2.2 Rede de Transporte SDH.....	32
2.2.3 Rede de Transporte OTN/WDM .....	34
2.3 Programação Linear.....	38
2.3.1 Formulação Nó-Arco.....	41
2.3.2 Formulação Arco-Caminho .....	42
2.3.3 Algoritmo $k$ -Caminhos .....	43
2.4 Modelagem <i>Fuzzy</i> .....	44
2.5 Algoritmos Genéticos.....	46
2.5.1 Aptidão e Seleção .....	47
2.5.2 <i>Crossover</i> .....	48
2.5.3 Mutação .....	49
2.5.4 Elitismo.....	50

2.5.5	Critérios de Parada.....	50
2.6	Algoritmo <i>Firefly</i> .....	51
2.6.1	<i>Firefly</i> Discreto.....	53
2.7	Comentários Finais.....	55
Capítulo 3. O Modelo Geral de Programação Linear Inteira 0-1 para Rede de Transporte Ópticas 57		
3.1	Representação Gráfica da Rede.....	57
	Notação.....	60
3.2	Modelo Geral MILP 0-1.....	61
3.3	Modelo Geral ILP 0-1.....	62
3.4	Modelagem de Demanda Imprecisa.....	63
3.4.1	Processo de Defuzzyficação.....	64
3.5	Algoritmo Genético para Resolver o ILP.....	66
3.6	Algoritmo <i>Firefly</i> para Resolver o ILP.....	71
3.7	Algoritmo HFA para Resolver o ILP.....	75
3.8	Comentários Finais.....	77
Capítulo 4. Modelos para Redes de Transportes Ópticas PDH – Implementação Computacional..... 79		
4.1	Implementação Computacional dos Modelos C4-1 ao C4-3 para a Rede PDH.....	80
4.1.1	Modelo C4-1 (MILP).....	80
4.1.2	Modelo C4-2 (ILP-GA).....	82
4.1.3	Modelo C4-3 (ILP-FA).....	84
4.2	Implementação Computacional dos Modelos C4-4 ao C4-6 para a Rede PDH.....	86
4.2.1	Modelo C4-4 (MILP- <i>Fuzzy</i> ).....	86
4.2.2	Modelo C4-5 (ILP-GA- <i>Fuzzy</i> ).....	87
4.2.3	Modelo C4-6 (ILP-FA- <i>Fuzzy</i> ).....	88

4.3	Comentários Finais.....	89
Capítulo 5. Modelos para Redes de Transportes Ópticas OTN/WDM – Implementação Computacional..... 90		
5.1	Implementação Computacional dos Modelos C5-1 ao C4-4 para a Rede OTN/WDM	91
5.1.1	Modelo C5-1 (ILP).....	91
5.1.2	Modelo C5-2 (ILP-GA).....	92
5.1.3	Modelo C5-3 (ILP-FA).....	94
5.1.4	Modelo C5-4 (ILP-HFA).....	95
5.2	Implementação Computacional do Modelos C5-5 ao C5-8 para a Rede OTN/WDM..	97
5.2.1	Modelo C5-5 (ILP- <i>Fuzzy</i> ) .....	97
5.2.2	Modelo C5-6 (ILP- <i>Fuzzy</i> -GA) .....	98
5.2.3	Modelo C5-7 (ILP- <i>Fuzzy</i> -FA) .....	99
5.2.4	Modelo C5-8 (ILP- <i>Fuzzy</i> -HFA).....	100
5.3	Comentários Finais.....	100
Capítulo 6. Resultados das Aplicações dos Modelos para Redes de Transporte Ópticas PDH		
	102	
6.1	Informações Relevantes da Rede PDH.....	102
6.2	Estudo de Caso 01: Rede PDH com Modelo C4-1 (MILP) .....	104
6.3	Estudo de Caso 02: Rede PDH com Modelo C4-4 (MILP- <i>Fuzzy</i> ).....	106
6.4	Estudo de Caso 03: Rede PDH com Modelo C4-2 (ILP-GA).....	110
6.5	Comentários Finais.....	113
Capítulo 7. Resultados das Aplicações dos Modelos para Redes de Transporte Ópticas OTN/WDM 114		
7.1	Informações Relevantes da Rede OTN/WDM.....	114
7.2	Estudo de Caso 01: Rede OTN/WDM com Modelo C5-1 (ILP) .....	117

7.3	Estudo de Caso 02: Rede OTN/WDM com os Modelo C5-2 (ILP-GA) e C5-3 (ILP-FA)	118
7.4	Estudo de Caso 03: Rede OTN/WDM com Modelo C5-2 (ILP-GA), C5-3 (ILP-FA) e C5-4 (ILP-HFA).....	123
7.5	Comentários Finais.....	130
Capítulo 8.	Conclusão.....	131
8.1	Trabalhos Futuros.....	132
Referências	.....	134
Anexo I	.....	144

---

## LISTA DE FIGURAS

---

Figura 2.1: Hierarquia de rede baseada na Geografia .....	30
Figura 2.2: Hierarquia rede OTN .....	35
Figura 2.3: Domínio óptico .....	35
Figura 2.4: Formação de quadro para rede OTN.....	36
Figura 2.5: Estruturas das camadas da OTN .....	37
Figura 2.6: Estrutura geral de modelagem.....	39
Figura 2.7: Rede com três nós .....	41
Figura 2.8: Fluxo de demanda .....	41
Figura 2.9: Possibilidades de caminhos para rede de três nós.....	42
Figura 2.10: Fluxograma de um GA simples .....	47
Figura 2.11: Exemplo de <i>crossover</i> ponto único .....	48
Figura 2.12: Exemplo de <i>crossover</i> dois pontos.....	49
Figura 2.13: Exemplo de <i>crossover</i> uniforme .....	49
Figura 2.14: Troca de posição de genes .....	50
Figura 2.15: Troca de cromossomos.....	50
Figura 2.16: Fluxograma de um FA simples .....	52
Figura 3.1: Topologia rede arco-caminho .....	58
Figura 3.2: Modelagem <i>fuzzy</i> da demanda .....	64
Figura 3.3: Variação dos limites de demanda.....	65
Figura 3.4: Codificação do cromossomo e estrutura do genoma .....	66
Figura 3.5: Fluxograma do Modelo C3-4 GA .....	67
Figura 3.6: <i>Crossover</i> .....	70
Figura 3.7: Processo de mutação .....	71
Figura 3.8: Fluxograma do Modelo C3-5 FA.....	72
Figura 3.9: Movimento do <i>firefly</i> .....	73
Figura 3.10: Movimento do <i>firefly</i> .....	74
Figura 3.11: Fluxograma do Modelo C3-6.....	76
Figura 4.1: Matrizes de restrições modelo C4-1.....	81

Figura 4.2: Fluxograma do modelo C4-2 para a rede PDH.....	83
Figura 4.3: Fluxograma do modelo C4-3 para a rede PDH.....	85
Figura 4.4: Matrizes de restrições modelo C4-4 para a rede PDH.....	86
Figura 4.5: Fluxograma do modelo C4-5 para a rede PDH.....	87
Figura 4.6: Fluxograma do modelo C4-6 para a rede PDH.....	88
Figura 5.1: Matrizes de restrições de demanda do Modelo C5-1 para a rede OTN/WDM.....	92
Figura 5.2: Fluxograma do modelo C5-2 para a rede OTN.....	93
Figura 5.3: <i>Crossover</i> uniforme do modelo C5-2.....	94
Figura 5.4: Fluxograma do modelo C5-3 para a rede OTN.....	95
Figura 5.5: Fluxograma do modelo C5-4 para a rede OTN.....	96
Figura 5.6: Matrizes de restrições do Modelo C5-5 para a rede OTN/WDM.....	97
Figura 5.7: Fluxograma do modelo C5-6 para a rede OTN.....	98
Figura 5.8: Fluxograma do modelo C5-7 para a rede OTN.....	99
Figura 5.9: Fluxograma do modelo C5-8 para a rede OTN.....	100
Figura 6.1: Topologia da rede PDH.....	103
Figura 6.2: Rede solução Cenário-01 e Cenário-02 .....	106
Figura 6.3: Rede solução do Cenário-03 para $\alpha=0$ e para $\alpha=1$ .....	109
Figura 6.4: Rede solução do Cenário-04 para $\alpha=0$ e para $\alpha=1$ .....	109
Figura 6.5: Custo da rede GA-2 <i>versus</i> gerações .....	111
Figura 6.6: Topologia da rede solução GA-2 .....	112
Figura 7.1: Rede <i>backbone</i> WDM.....	115
Figura 7.2: Rede solução do método exato.....	118
Figura 7.3: Convergência dos algoritmos para $k=10$ .....	119
Figura 7.4: Convergência dos algoritmos para $k=14$ .....	119
Figura 7.5: Convergência dos algoritmos para $k=20$ .....	120
Figura 7.6: Comparativo de convergência para $k=10$ .....	121
Figura 7.7: Rede solução para $k=10$ .....	122
Figura 7.8: Convergência dos métodos $k=10$ .....	125
Figura 7.9: Convergência dos métodos $k=14$ .....	125
Figura 7.10: Convergência dos métodos $k=20$ .....	125
Figura 7.11: Rede <i>backbone</i> WDM.....	127

---

## LISTA DE TABELAS

---

Tabela 2.1: Taxas da PDH.....	32
Tabela 2.2: Taxas da SDH.....	33
Tabela 2.3: Hierarquia de taxas da rede OTN .....	37
Tabela 2.4: Hierarquia de comutação/multiplexação da rede OTN .....	37
Tabela 3.1: Escoamento de demanda .....	59
Tabela 6.1: Instância da SNDlib.....	103
Tabela 6.2: Valores de demandas previstos.....	104
Tabela 6.3: Resultados SNDlib x Cenários .....	105
Tabela 6.4: Demanda prevista imprecisa.....	107
Tabela 6.5: Resultados Cenário-03.....	108
Tabela 6.6: Resultados Cenário-04.....	108
Tabela 6.7: Configurações do Cenário-05.....	110
Tabela 6.8: Resultados Cenário-05 proposto.....	111
Tabela 7.1: Demandas da rede <i>backbone</i> .....	116
Tabela 7.2: Custos dos equipamentos DWDM .....	116
Tabela 7.3: Resultados do método exato .....	117
Tabela 7.4: Comparativo dos métodos bio-inspirados .....	119
Tabela 7.5: Comparativo entre GA e FA.....	120
Tabela 7.6: Comparativo entre os métodos para 10 caminhos.....	121
Tabela 7.7: Configurações do FA e HFA.....	123
Tabela 7.8: Configurações GA .....	123
Tabela 7.9: Comparativo entre os algoritmos.....	124
Tabela 7.10: Comparativo do tempo de processamento.....	124
Tabela 7.11: Comparativo de custo entre os métodos .....	126
Tabela 7.12: Comparativo entre os métodos .....	126
Tabela 7.13: Demandas da Rede 2 .....	128
Tabela 7.14: Comparativo entre os algoritmos – Rede 2 .....	128

Tabela 7.15: Comparativo do tempo de processamento – Rede 2.....	129
Tabela 7.16: Comparativo entre os métodos – Rede 2.....	130

---

## LISTA DE ABREVIATURAS

---

3R	<i>Reamplification, Reshaping and Retiming</i>
ABC	<i>Artificial Bee Colony</i>
AG	<i>Algoritmos Genéticos</i>
CFLP	<i>Capacified Facility Location Problem</i>
DTH	<i>Digital Transport Hierarchy</i>
DWDM	<i>Dense Wavelength Division Multiplexing</i>
EDFA	<i>Erbium Doped Fiber Amplifiers</i>
FA	<i>Algoritmo Firefly</i>
FC	<i>Fiber Channel</i>
CBR	<i>Flex-Constante</i>
FEC	<i>Forward Error Correction</i>
GA	<i>Algoritmos Genéticos</i>
GFP	<i>Generic Framing Procedure</i>
GbE	<i>Gigabit Ethernet</i>
IP	<i>Internet Protocol</i>
HFA	<i>Algoritmo Híbrido Firefly-Genético</i>
ILP	<i>Integer Linear Programming</i>
IoT	<i>Internet of Things</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
LCAS	<i>Link Capacity Adjustment Scheme</i>
ITU	<i>International Telecommunication Union</i>
MILP	<i>Mixed Integer Linear Programming</i>
NMS	<i>Network Management System</i>
OMA	<i>Operations, Administration, and Maintenance</i>
OADM	<i>Optical Add-Drop Multiplexer</i>
OCh	<i>Optical Channel</i>
ODU	<i>Optical Channel Data Unit</i>

OPU	<i>Optical Channel Payload Unit</i>
OTU	<i>Optical Channel Transport Unit</i>
OMS	<i>Optical Multiplex Section</i>
OTS	<i>Optical Transmission Section</i>
OTH	<i>Optical Transport Hierarchy</i>
OSI	<i>Open System Interconnection</i>
OTN	<i>Optical Transport Network</i>
PDH	<i>Plesiochronous Digital Hierarchy</i>
PSO	<i>Particle Swarm Optimization</i>
PSTN	<i>Public Switched Telephone Network</i>
PTT	<i>Pontos de Troca de Tráfego</i>
ROADM	<i>Reconfigurable Optical Add-Drop Multiplexer</i>
SAD	<i>Sistemas de Apoio a Decisão</i>
SDH	<i>Synchronous Digital Hierarchy</i>
SDH-NG	<i>Synchronous Digital Hierarchy Next Generation</i>
SFP	<i>Small Form-Factor Pluggable</i>
SNDlib	<i>Survivable Network Design library</i>
SONET	<i>Synchronous Optical Digital Network</i>
STM	<i>Synchronous Transport Module</i>
TDM	<i>Time Division Multiplexing</i>
TSP	<i>Traveling Salesman Problem</i>
VCAT	<i>Virtual Concatenation</i>
VoIP	<i>Voice over Internet Protocol</i>
WAN	<i>Wide Area Network</i>
WDM	<i>Wavelength-Division Multiplex</i>

---

## Capítulo 1. INTRODUÇÃO

---

O surgimento de novas tecnologias e serviços vem impondo mudanças substanciais aos sistemas de telecomunicações. Estas transformações estão acontecendo em grande escala para atender o desenvolvimento da Internet das Coisas (IoT - *Internet of Things*), da computação em nuvem e dos sistemas de comunicações móveis de 4ª e 5ª geração [1] [2] [3]. O impacto imediato da implantação e utilização destas tecnologias surge com a necessidade se ter uma rede de telecomunicações com alta capacidade na transmissão de dados.

No segmento de rede responsável pelo acesso do usuário, a rede ainda continua bastante capilarizada, devido à variedade de serviços oferecidos. A inovação surge com a diversidade de tecnologias que são desenvolvidas para oferecer estes serviços, sejam elas para o segmento fixo cabeado, sejam para o segmento móvel celular [4].

Por outro lado, no núcleo da rede, o *backbone*, o compartilhamento de recursos é uma atividade fundamental. O desenvolvimento de novas tecnologias de comutação, gerenciamento e transmissão procuram explorar a enorme capacidade de operação da fibra óptica [5].

A demanda atual por acesso a informação trouxe a necessidade de altas taxas de transmissão, no cenário nacional, redes de transporte utilizando as tecnologias Hierarquia Digital Plesiócrons (PDH - *Plesiochronous Digital Hierarchy*) e Hierarquia Digital Síncrona (SDH - *Synchronous Digital Hierarchy*) continuam sendo uma realidade, principalmente nos segmentos periféricos da rede. A evolução tecnológica das redes PDH e SDH tem sido executada pelas operadoras de redes de fibra óptica, conforme exigências de mercado (capacidade de transmissão, eficiência no gerenciamento e operação, etc) [6].

Em termos mercadológicos, a rede de transporte óptica (OTN - *Optical Transport Network*) vem sendo apontada como a responsável pela evolução das redes PDH e SDH [7]. Essas redes são compostas por elementos de rede, conectados por fibra ópticas capazes de fornecerem funcionalidades de transporte, multiplexação, roteamento, gerência, supervisão, sobrevivência dos canais ópticos transportando informações de acordo com a recomendação G.709 da ITU-T (*International Telecommunication Union*) [8], que é um protocolo da nova geração que fornece um transporte eficiente por canalização óptica baseado em comprimentos de onda, oferecendo melhor

integridade, gerência, multiplexagem e altas taxas de transmissão. As redes de transportes ópticas podem conectar estações base de celulares e sistemas 5G [9].

O planejamento do sistema fica condicionado a transformações. Por um lado, é possível haver seletividade no atendimento da demanda, o que significa dizer que as demandas potencialmente mais lucrativas serão prioritárias. Por outro lado, existe a variedade de serviços a se oferecer, cada qual gerando receita diferenciada e eventualmente exigindo equipamentos, topologias e meios de transmissão específicos. A limitação orçamentária, naturalmente, é outro fator a ser previsto, pois nem sempre é possível implantar todos os sistemas necessários ao atendimento pleno da demanda. O dimensionamento dos sistemas precisa, portanto, contemplar fatores técnicos e econômicos que vão além da tarefa de planejar a rede objetivando o custo mínimo, seja de implantação, aluguel, manutenção e/ou operação. Implantar soluções que signifiquem garantia de participação no mercado e receitas compensadoras é uma questão de sobrevivência [10].

Num ambiente com propostas de novos serviços e tecnologias, alguns dados fundamentais para a etapa de planejamento, tais como demanda, receita, custo de equipamentos, aluguel de rede, taxa de juros aplicada, nem sempre são precisos e encontram-se disponíveis. As variações nestes parâmetros afetam o dimensionamento dos sistemas e os valores dos contratos. Estas informações representam, portanto, um ponto crítico no processo de decisão. Numa situação típica, o planejador até que é capaz de identificar uma faixa de possíveis valores para os dados utilizados no planejamento, inclusive com discriminação de valores com maior ou menor possibilidade de ocorrência. Esta particularidade quanto aos dados sugere a adoção do conceito de conjuntos *fuzzy* para representá-los. Porém, a presença de conjuntos *fuzzy* pode alterar substancialmente o procedimento de resolução dos modelos. O objetivo aqui é propor uma modelagem para otimização mais flexível e, conseqüentemente, sugerir propostas de resolução também para estes modelos com dados imprecisos [11].

Assim, a expansão dos sistemas de transporte requer intensa atividade de planejamento. Onde, quando, quanto e como investir são questões para as quais o planejamento deve encontrar respostas. A enorme quantidade de opções técnico-mercadológicas a se analisar requer, previamente, escolhas essencialmente difíceis. Além disto, a complexidade dos problemas e a velocidade das transformações exigem metodologias de planejamento consistentes, flexíveis, capazes de suportar diferentes cenários e apoiados em ferramentas computacionais. Os valores

significativos, geralmente envolvidos neste tipo de situação, tornam desejável o uso de sistemas de apoio à decisão baseados em modelos matemáticos [12].

Nestas circunstâncias, é evidente que a rede óptica está sujeita a inovações tecnológicas constantemente, e assim aproveitar melhor a infraestrutura atual para as altas taxas de transmissão. Por outro lado, à medida que a rede se torna mais complexa, a utilização eficiente dos seus recursos torna-se um problema de grande preocupação. A busca por algoritmos para otimizar a capacidade dos recursos é uma orientação promissora no sentido de melhorar os Sistemas de Apoio a Decisão (SAD) criados para auxiliar no planejamento da rede.

Neste cenário, é natural que diferentes problemas de otimização venham sendo propostos na literatura para o dimensionamento de redes de transporte ópticas. As metodologias empregadas em cada caso são extremamente influenciadas pela abrangência da rede, pela tecnologia de transmissão a ser utilizada e pelas fontes de informações disponíveis. Entretanto, uma característica comum entre estes problemas de otimização é que eles, impreterivelmente, possuem uma matriz de interesse de tráfego que necessita ser roteada desde os nós de origem até os nós destino [13].

Na literatura sobre projetos/planejamento de redes encontra-se um vasto e rico campo de aplicações, como por exemplo, rede de telecomunicações, água, gás, transporte urbano, etc. A modelagem mais utilizada para representar as topologias destas redes são os grafos, sendo que cada vértice (nó) corresponde aos pontos que são interligados entre si através da aresta (caminho) [14].

O planejamento de redes de telecomunicações insere-se numa gama de problemas complexos a serem solucionados por sistemas computacionais e isso se explica pelo fato da relação do número de nós com as possibilidades de conexões criadas pela inclusão de cada nó na rede. Essa relação entre número de nós e possibilidade de enlaces é dada em uma relação fatorial, o que indica um problema combinatorial, e quando se trabalha com casos onde a rede tem a possibilidade de expansão isso exige mais esforço computacional para encontrar a solução [15]. A resolução para este tipo de problema pode ser através de métodos exatos ou por métodos heurísticos.

O problema de planejamento de redes de transporte ópticas tem sido bastante estudado na literatura [16]. O objetivo principal do planejamento quase sempre é o mesmo: alocar e dimensionar os recursos disponíveis da forma mais eficiente possível em termos de orçamento, com os modelos de otimização orientados a minimização de custos. Basicamente, as metodologias se divergem devido a: quais tecnologias adotadas, quais recursos são considerados como mais relevantes para o objetivo que se deseja alcançar e a abrangência da rede a ser dimensionada [17].

O trabalho de [18] descreve a biblioteca pública SNDlib (*Survivable Network Design library*). O objetivo é fornecer dados realistas de planejamento de rede que podem ser usados para comparar diferentes modelos matemáticos e algoritmos de otimização. A SNDlib contém 22 topologias de rede com 830 instâncias de teste que podem ser utilizadas para o planejamento de redes ópticas, nas tecnologias PDH (*Plesiochronous Digital Hierarchy*), SDH (*Synchronous Digital Hierarchy*), WDM (*Wavelength-Division Multiplex*), entre outras [19].

Para redes SDH, mecanismos de roteamento de demanda com múltiplos caminhos são propostos em [20], [21] e [22]. Nestes trabalhos, a Programação Linear Inteira (ILP – *Integer Linear Programming* - Programação Linear Inteira) é utilizada para selecionar os caminhos ótimos a partir de um conjunto de caminhos pré-computados para cada demanda.

Ainda utilizando a abordagem arco-caminho, o trabalho de [23] fornece uma ferramenta para analisar o comprometimento entre o número de transceptores alocados e a forma de utilização da rede. Com o objetivo de se fazer uso eficiente dos recursos disponíveis, a metodologia desenvolvida está baseada em um MILP (*Mixed Integer Linear Programming* - Programação Linear Inteira Mista) que é utilizado para avaliar o dimensionamento de redes OTN.

Com o crescimento explosivo das demandas, oriundas de várias fontes de serviços, a atuação da rede de transporte frente a possíveis falhas tornou-se um campo de estudo de grande relevância. Em [24] é proposto um algoritmo heurístico para resolver o problema de roteamento no contexto das redes OTN/DWDM (*Dense Wavelength Division Multiplexing*) de rede flexível. A aplicação envolve vários cenários de rede em relação à topologia, distribuição de tráfego e formatos de transmissão disponíveis, a fim de quantificar os benefícios de eficiência de implantação de formatos de *grid* flexível.

Já o trabalho de [25] apresenta uma modelagem multiobjetivo para otimizar a implantação de rede OTN/WDM com diversidade de canal e com diferentes graus de resiliência a falhas de *links* e *transponders*. O algoritmo proposto permite considerar todos esses diferentes aspectos simultaneamente, com destaque para o grau em que o custo da rede pode ser negociado para diferentes níveis de proteção.

As meta-heurísticas inspiradas na natureza são ferramentas poderosas para resolver problemas de otimização *NP-Hard*. Esses métodos são baseados nos mecanismos existentes nos fenômenos biológicos da natureza [26]. Para redes ópticas, é possível destacar o uso do algoritmo genético [25] [27] [28] e algoritmos baseados em enxame [29] [30] [31], como o algoritmo de

otimização de enxame de partículas (PSO – *Particle Swarm Optimization*) [32], colônia de formigas [33] e algoritmo de vaga-lume (*firefly*) [34] [35].

A virtualização utilizada em redes ópticas elásticas (utilizam intervalos de frequência (*slots*) como unidade base para atendimento) possibilitou compartilhar a mesma rede física para usuários e aplicativos diferentes. Para buscar melhor eficiência de utilização destes recursos o trabalho de [36] propõe um algoritmo genético de mapeamento de rede óptica virtual, que alcance a menor probabilidade de bloqueio de largura de banda e que economize o consumo de energia. Um mecanismo de sobrevivência é introduzido para preservar o indivíduo mais apto. Um operador de *crossover* adaptativo baseado na comparação hierárquica é projetado e para melhorar a diversidade da população é apresentada uma estratégia de mutação de restrição.

Ainda sobre o problema de alocação de fluxo em redes ópticas elásticas, o trabalho [37] propõe duas metaheurísticas baseadas em otimização, uma pelo algoritmo de enxame de partículas e a outra pela busca de tabu e é representado por um ILP. No artigo [38] é proposto um método de otimização baseado no algoritmo colônia de abelhas (ABC – *Artificial Bee Colony*) também modelado por um ILP.

Os trabalhos [39] [40] apresentam propostas de algoritmos híbridos (HFA – *Hybrid Firefly-Genetic Algorithm*), baseados no algoritmo *firefly*, usando operadores de *crossover* e mutação do algoritmo genético, um para o TSP (*Traveling Salesman Problem*) e outro para o CFLP (*Capacified Facility Location Problem*), respectivamente. O operador de *crossover* é usado para ajudar o algoritmo do *firefly* a explorar a busca de melhores soluções com mais eficiência e o operador de mutação é utilizado para aumentar a diversidade dos vaga-lumes na população.

Tendo em vista a conjuntura delineada anteriormente, este trabalho tem como objetivo desenvolver modelos de otimização, utilizando os modelos ILP e MILP com a modelagem arco-caminho, acrescidos de lógica *fuzzy*, algoritmos genéticos e *firefly* para verificar/analisar problema de planejamento de rede óptica. Os modelos desenvolvidos são aplicados a rede PDH da biblioteca SNDlib (*Survivable Network Design Library*), um repositório que contém instâncias de testes para problemas de otimização em redes de telecomunicações [18] e também em uma rede atual (OTN/WDM) e realista em termos de dados disponíveis para planejamento.

Diferentemente das abordagens propostas em [24] [38] [37] [41], uma das características marcantes da proposta é o dimensionamento da rede através de um processo de alocação dinâmica de recursos, além da possibilidade de drenar demandas considerando vários nós de transbordo.

## 1.1 Contribuições do Trabalho

A modelagem ILP proposta neste trabalho permite contemplar o atendimento de uma matriz de tráfego peculiar, ainda não abordada na literatura. As matrizes comumente avaliadas são compostas de pares de nós, indicando o nó de origem e o nó de destino. Neste trabalho, os modelos ILP desenvolvidos para a rede OTN/WDM e os algoritmos bio-inspirados considerados para a resolução dos modelos contemplam a possibilidade de aplicar uma matriz de tráfego de demanda com seu nó de origem, mas com uma diversidade de nós de destino.

No modelo ILP proposto os recursos da rede são dimensionados de forma dinâmica, sendo que a capacidade de cada sistema de transmissão é especificada de acordo com as melhores soluções de escoamento de tráfego identificadas em cada *link* da rede. Este processo de alocação permite o modelo valorizar aquelas soluções com melhor compartilhamento de recursos, em detrimento da utilização de vários *links* paralelos operando, oportunamente, com ociosidade em cada um.

Neste trabalho, foi utilizada a abordagem arco-caminho ao invés de nó-arco na modelagem do tráfego da rede referente às resoluções do MILP e do ILP, permitindo assim avaliar cenários com matrizes de demanda que possuem diversidade de encaminhamento, ou seja, diversos nós de destino. Vale destacar os ajustes realizados na modelagem ILP para atender o perfil de matriz de tráfego da rede realista OTN/DWDM. A possibilidade de escoamento de cada demanda prevista para dois destinos, permite avaliar cenários com possibilidade de preferências de atendimento.

Abordou-se a modelagem *fuzzy* dos dados imprecisos de demanda e, conseqüentemente, a resolução do MILP e do ILP com dados *fuzzy* nos termos independentes das restrições de atendimento de demanda. Diferentemente do que é feito em [42], a modelagem realizada neste trabalho permite tratar a imprecisão ainda mantendo flexibilidade quanto ao intervalo previsto para a variação dos valores de demanda. O comprometimento na complexidade computacional (a proposta de solução exige dobrar o número de restrições de atendimento de demanda ao mesmo tempo em que as equações são substituídas por inequações) justifica-se pela modelagem permitir o dimensionamento da rede com folga nos valores de demanda, entre os seus limitantes inferiores e superiores, conforme o grau de confiança do planejador. Esta característica se apresenta como bastante promissora para uma futura modelagem multi-objetivo com cenários conflitantes como, por exemplo, de minimização de custo e maximização de folga.

Em tempos de folga na rede, a metodologia ILP desenvolvida aqui permite vislumbrar um dimensionamento com garantia de folga por *link* alocado. Esta exigência de planejamento pode ser atendida com a indicação de um simples fator de carregamento de demanda por *link* no conjunto de restrições de capacidade técnica.

Não se pode negar a importância dos pacotes comerciais como ambientes de prototipagem. Mas, a abordagem de resolução dos modelos *fuzzy* através de algoritmos genéticos e *firefly* permite criar uma ferramenta computacional com independência quanto à plataforma de desenvolvimento, característica bastante atrativa para a confecção de um produto comercial.

Neste trabalho, foi proposta também a utilização de um algoritmo híbrido (HFA) descrito na Seção 3.7 onde mostrou ser eficaz em termos de desempenho da resposta, tanto para uma rede de grande e de pequeno porte. Para a rede menor, o algoritmo HFA não precisa ter seus parâmetros excessivamente ajustados para obter uma boa solução. Com a comparação entre as redes (grande e pequena), foi possível observar que o desempenho do método exato depende do volume de informações (espaço de busca). Vale ressaltar que, para ambas as redes (grande e pequena), o HFA proposto forneceu excelentes resultados com pequena variabilidade entre as soluções obtidas.

Assim, em resumo, as contribuições deste trabalho são:

- 1- Proposta de uma formulação matemática (MILP e ILP) para o problema de planejamento de redes ópticas;
- 2- Proposta de aplicação da modelagem *fuzzy* na formulação MILP que permite tratar a imprecisão e manter a flexibilidade quanto ao intervalo previsto para a variação dos valores de demanda em redes PDH;
- 3- Proposta de uso de um método de otimização híbrido, utilizando o algoritmo *firefly* e o genético, para solucionar um problema ILP, para o planejamento de rede de transporte óptica (OTN), considerando a minimização de custos;
- 4- Proposta de uma modelagem de rede que considera uma matriz de interesse de tráfego na qual cada demanda está associada a um único nó de origem e a vários nós de destino, permitindo avaliação completa do serviço de rede dos nós, utilizando a abordagem arco-caminho;
- 5- Na abordagem proposta para o ILP os recursos de rede são alocados dinamicamente com determinação da capacidade de cada sistema de transmissão de acordo com as melhores soluções para os *links* de fluxo de tráfego.

## 1.2 Organização da Tese

Para atingir o que se propõe, este trabalho está organizado da seguinte forma:

Capítulo 2 – descreve o sistema de telecomunicações. Atenção maior é dada às redes de transportes ópticas. São detalhadas as tecnologias PDH (*Plesiochronous Digital Hierarchy*), SDH (*Synchronous Digital Hierarchy*) e OTN (*Optical Transport Network*) para rede de transporte. A descrição não pretende ser completa, mas é suficiente para o nível de detalhe seguido no restante do trabalho. Também se apresenta conceitos de programação linear, um dos destaques fica por conta da escolha do critério de otimização. O planejamento orientado à minimização é o mais explorado. Após discute-se tipos de formulações que podem ser utilizadas com a programação linear (nó-arco e arco-caminho), destaca-se a importância dos caminhos candidatos no processo decisório, podendo ser realizada pelo planejador ou via algoritmo (*k-caminhos*). As técnicas de inteligência artificial são descritas. Para o tratamento de dados imprecisos, discute-se conceitos da modelagem *fuzzy* e após detalha-se os pontos importantes no desenvolvimento do algoritmo genético e *firefly*.

Capítulo 3 – apresenta as descrições dos modelos matemáticos MILP e ILP, com variáveis 0-1, para o planejamento de redes de transportes ópticas. Apresenta-se os conceitos para representação gráfica da rede e após introduz o modelo geral MILP e após o ILP. A modelagem para demanda imprecisa é realizada através de sistemas *fuzzy*, trazendo as modificações necessárias no modelo geral para suportar tais dados. A resolução dos modelos ILP/MILP-*Fuzzy* com algoritmo genético e *firefly* são detalhados.

Capítulo 4 – apresenta a descrição dos modelos matemáticos MILP e ILP apresentado no Capítulo 3 aplicados para rede de transportes ópticas PDH, destacando as propostas de adaptações (ou ajustes) no modelo geral de programação para atender as especificidades da rede, da tecnologia, da matriz de demanda prevista e restrições de atendimento.

Capítulo 5 – apresenta as descrições do modelo matemático ILP apresentado no Capítulo 3 aplicado para rede de transportes ópticas OTN/WDM. É destacado as propostas de adaptações no modelo geral de programação ILP para atender as especificidades da rede, da tecnologia, da matriz de demanda prevista e restrições de atendimento.

Capítulo 6 – são discutidas a aplicação dos modelos tratados no Capítulo 4, de minimização de custo para implantação de rede de transporte PDH em telecomunicações. As mudanças para permitir a análise de diferentes comportamentos de matriz de demandas também são contempladas. Nestas

circunstâncias, os ajustes nos algoritmos de resolução dos modelos de otimização evidenciam a flexibilidade de adaptação da metodologia proposta neste trabalho.

Capítulo 7 – são discutidas a aplicação do modelo ILP tratado no Capítulo 5, discute a aplicação da metodologia no planejamento de sistemas de telecomunicações e relata as aplicações com meta-heurística em telecomunicações para a implantação de rede *backbone*. São apresentados resultados de simulações computacionais de cenários que envolvem diversidade: de técnicas de resolução dos modelos de otimização; de topologia de rede, de tecnologia adotada, de matriz de tráfego, entre outros.

---

## Capítulo 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

---

Este capítulo é destinado para a descrição geral do sistema de telecomunicações (Seção 2.1) com destaque no planejamento estratégico e a tomada de decisões que é o tema principal deste trabalho. São apresentadas na Seção 2.2, as tecnologias atuais em redes de transportes ópticas. Posteriormente são tratados os conceitos de programação linear inteira mista e programação linear inteira (Seções 2.3). Os modelos de otimização aqui propostos têm como base essas programações. As técnicas de inteligência artificial, lógica *fuzzy*, algoritmos genéticos e *firefly*, que são incorporadas aos modelos estão descritas nas Seções 2.4, 2.5 e 2.6, respectivamente.

### 2.1 Sistemas de Telecomunicações

Um sistema de telecomunicações pode ser definido como um conjunto ordenado de equipamentos e meios de transmissão que permite a transferência de informações de um ponto a outro, mantida a privacidade e integridade destas informações. Existem diferentes formas pelas quais os usuários de telecomunicações podem ser interligados. Entretanto, o tipo de informação a ser transmitida (vídeo, dados, telefonia convencional, VoIP, etc.) impõe exigências sobre alguns aspectos das redes, levando-as a serem especializadas, e não totalmente independentes dos serviços que oferecem.

A utilização da fibra óptica para sistemas de comunicações determinou um marco histórico na evolução destes sistemas, pois as fibras ópticas, que são estruturas finas e flexíveis constituídas de vidro ou plástico, permitem propagar o sinal de informação utilizando ondas de luz por longas distâncias e com alta velocidade [43].

A fibra óptica é um cabo que fornece uma transmissão com baixa perda e seu benefício mais significativo é sua capacidade potencial. Não somente a fibra óptica ofereceu a possibilidade de uma enorme taxa de transmissão, mas também deu ascensão para redes ópticas. Uma rede óptica é composta pelos cabos de fibra óptica que transportam luz, combinado com o equipamento implantado ao longo da fibra para processar a luz. As capacidades de uma rede óptica estão necessariamente ligadas à física da luz e as tecnologias para manipular essa luz. Como tal, a

evolução das redes ópticas têm sido marcadas por grandes mudanças de paradigmas e avanços das tecnologias desenvolvidas [44].

Um dos primeiros avanços tecnológicos foi a capacidade de transportar vários canais de luz em uma única fibra. Cada fluxo de luz, ou comprimento de onda ( $\lambda$ ), é transportado em uma frequência óptica e multiplexada (isto é, combinada) em uma única fibra, dando surgimento para multiplexação por divisão de comprimento de onda (*Wavelength Division Multiplexing* - WDM). Os benefícios da escala fornecida pela rede óptica foram ainda mais acelerados pela taxa de *bits* crescente de um único comprimento de onda. Em meados dos anos 90, o máximo de taxa de *bits* de um comprimento de onda foi de aproximadamente 2,5 *Gbps*. Este tem aumentado até 10, 40, 100 e 400 *Gbps* [17].

No entanto, a capacidade de transmissão é apenas um fator na avaliação da qualidade de uma rede. A relação custo-benefício e escalabilidade da rede, incorporada também pela quantidade necessária de equipamentos, são de grande importância. Enquanto os *Erbium Doped Fiber Amplifiers* (EDFA) permitiram a remoção de uma quantidade considerável de equipamentos, cada comprimento de onda ainda sofreu processamento eletrônico em numerosos pontos na rede, ou seja, em cada local de comutação ou geração de tráfego ao longo do caminho de um comprimento de onda.

Como os níveis de tráfego de rede experimentaram um crescimento explosivo, exigiu o uso de uma enorme quantidade de terminação e comutação eletrônica equipamentos, que apresentaram desafios em custo, consumo de energia, dissipação de calor, espaço físico, confiabilidade, tempo de implantação e manutenção. Esses gargalos foram bastante reduzidos pelo desenvolvimento da tecnologia de *bypass* óptico, pois ela elimina grande parte do processamento eletrônico e permite que um sinal permaneça no domínio óptico para todo o seu caminho da fonte ao destino.

Um sistema de comunicação por fibra óptica é constituído por elementos básicos como transmissor, compreendendo a fonte de luz e o circuito de modulação associado, um cabo óptico, oferecendo proteção ao meio e mecânica às fibras ópticas nele contidas, e um receptor, englobando o fotodetector mais o circuito associado de amplificação e regeneração do sinal [45].

Ao considerar a introdução de novas tecnologias de rede, pode ser útil segmentar a rede em vários níveis geográficos. Os principais diferenciais entre os níveis são o número de clientes atendidos, a capacidade necessária e a extensão geográfica. A Figura 2.1 apresenta a divisão destas redes.

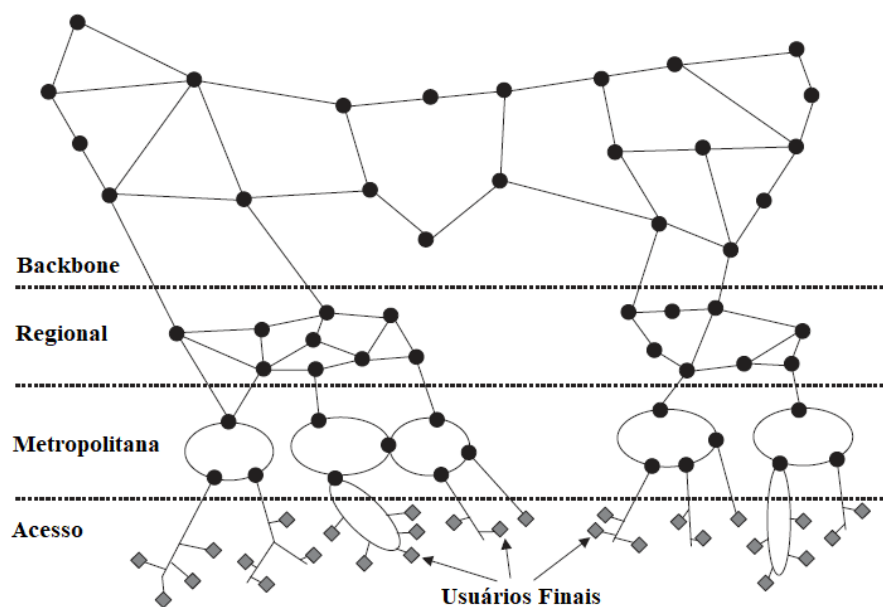


Figura 2.1: Hierarquia de rede baseada na Geografia

Fonte: [17]

A rede de acesso distribui/coleta tráfego para os clientes (assinantes) da rede, são plataformas de atendimento responsáveis por permitir a conexão de clientes ao seu provedor de serviços imediatos, neste caso as operadoras de telecomunicações. Possui baixa capacidade de multiplexação e disponibiliza meios físicos dedicados a clientes ou grupos de pequeno porte. Geralmente servem dezenas a centenas de clientes e abrangem alguns quilômetros. Pode-se subdividir ainda mais a camada de acesso em acesso comercial e residencial. Utilizam topologia em barramento, estrela ou árvore. Estas redes podem possuir um ou dois *hubs*, sendo o segundo em caso de falha, para conectar com a rede metropolitana.

A rede metropolitana possui a função de disponibilizar e compartilhar recursos aos clientes que estão conectados através das redes de acesso. São responsáveis por otimizar recursos e possui características em estabelecer conexões em menor tempo. Agrega o tráfego de milhares de clientes e estende-se de dezenas a centenas de quilômetros. Sua topologia pode ser em anel ou malha. Subindo a hierarquia, as redes metropolitanas são interconectadas via redes regionais. Uma rede regional transporta a parte do tráfego que se estende entre várias áreas metropolitanas e é compartilhada entre centenas de milhares de clientes, com uma extensão geográfica de centenas a milhares de quilômetros.

A conexão entre redes regionais é realizada pela rede *backbone* de longa distância, podem ser compartilhadas entre milhões de clientes e normalmente abrangem milhares de quilômetros.

Podem assumir a topologia ponto-a-ponto ou anel. É necessário que possua regeneradores ópticos em cada nó e em alguns pontos intermediários do enlace, assim como amplificadores, para manter a qualidade e integridade do sinal entre os *sites*. O *site* é um local que abriga equipamentos para conectar as placas de transmissão, recepção e multiplexação /demultiplexação de sinais ópticos [17]. O planejamento desta parcela do sistema de telecomunicações é o objeto de interesse deste trabalho. Os tipos de redes de transportes ópticas utilizadas no *backbone* são apresentadas na Seção 2.2.

## 2.2 Redes de Transportes Ópticas

As redes de transporte podem utilizar as seguintes tecnologias: Hierarquia Digital Plesiócrona (PDH - *Plesiochronous Digital Hierarchy*), Hierarquia Digital Síncrona (SDH - *Synchronous Digital Hierarchy*) ou a rede de transporte óptica (OTN - *Optical Transport Network*). No cenário nacional, redes de transporte utilizando as tecnologias PDH e SDH continuam sendo uma realidade, com maior relevância nos segmentos periféricos da rede, devido principalmente ao alto investimento já realizado nestas redes [46] [47]. A evolução tecnológica das redes PDH e SDH tem sido praticada pelas operadoras de redes de fibra óptica gradualmente, conforme exigências no aumento da capacidade de transmissão, acrescidas da eficiência nos processos de gerenciamento e operação para atender com qualidade os novos serviços. Nestas circunstâncias a rede OTN vem sendo apontada como a responsável pela evolução das redes PDH e SDH.

### 2.2.1 Rede de Transporte PDH

As redes de telecomunicações, no início da década de 80 tornaram-se cada vez mais complexas devido às técnicas digitais que proporcionaram maiores demandas e maiores números de usuários para as grandes empresas de telecomunicações. Desta forma, as operadoras não poderiam atender a aumentos de grandes magnitudes com os padrões de transmissão existentes [48].

Assim surgiram os sistemas de transmissão digital utilizando a técnica TDM (*Time Division Multiplexing*), os quais proporcionaram uma melhoria na relação sinal-ruído, aumentando de forma significativa as distâncias de transmissão. A técnica TDM foi estruturada nas redes PSTN (*Public Switched Telephone Network*), com o objetivo de transportar voz utilizando a tecnologia PDH que posteriormente o método de multiplexação passaria a ser a hierarquia digital síncrona (SDH) [49].

A tecnologia PDH surgiu com o objetivo de atender serviços de voz em que a técnica de multiplexação por divisão no tempo (TDM) era empregada para canais de comunicação. A multiplexação consiste em combinar dois ou mais canais em apenas um meio de transmissão. A PDH é uma rede hierárquica de vários níveis na qual o sinal agregado de cada ordem é formado pela junção de quatro sinais, denominados tributários, da ordem imediatamente inferior mediante o entrelaçamento de *bits*, ou seja, um *bit* do feixe 1 é seguido por um *bit* do feixe 2, e assim por diante [50]. A Tabela 2.1 ilustra os níveis e as taxas da PDH.

Tabela 2.1: Taxas da PDH

Fonte: [49]

Ordem	Nível da Hierarquia	Taxa Nominal (kb/s)	Número de Canais
1	E1	2.048,00	30
2	E2	8.448,00	120
3	E3	34.368,00	480
4	E4	139.264,00	1920

A rede PDH apresenta pouca capacidade de gerenciamento de rede e falta de padronização, o que faz com que a interconexão de sistemas de fornecedores diferentes se torne cara e ineficiente. Em decorrência desses problemas operacionais, um sistema mais flexível, com maior capacidade de gerenciamento e compatível com a tecnologia PDH, foi padronizado pelo ITU-T (*International Telecommunication Union – Telecommunication Standardization Sector*), esse sistema denominado hierarquia digital síncrona (*Synchronous Digital Hierarchy – SDH*) e o SONET (*Synchronous Optical Digital Network*) como uma nova tecnologia com maior confiabilidade, flexibilidade de comutação de taxas primárias, com interfaceamento padronizado, com maiores controles de gerenciamento e atendimento à novos serviços [51].

### 2.2.2 Rede de Transporte SDH

A hierarquia SDH pôde fornecer às redes de transporte altas taxas de transmissão e a possibilidade de gerenciamento de forma ampla e eficiente, tornando-as confiáveis. Além disso, os equipamentos da SDH puderam ser integrados aos sistemas de transmissão óptica, uma vez que foram padronizados pelo ITU-T. O SDH pode transportar também os diferentes tipos de sinais PDH, através do *frame* padronizado denominado STM-N (*Synchronous Transport Module*), utilizado tanto

para sinais elétricos como para sinais ópticos [49]. Atualmente o padrão SDH utiliza *frames* STM-N com as taxas de *bits* apresentada na Tabela 2.2.

Tabela 2.2: Taxas da SDH

Fonte: [49]

Nível	Taxa de Transmissão Mb/s
STM-0	51,84
STM-1	155,52
STM-4	622,08
STM-16	2.488,32
STM-64	9.953,28
STM-256	39.813,12

As redes SDH formam um sistema síncrono onde todos os relógios de seus equipamentos têm, em média, a mesma frequência, garantindo a distribuição e qualidade do sinal de sincronismo. O padrão SDH foi desenvolvido usando a abordagem cliente/servidor e sua arquitetura de administração e supervisão seguiu o modelo de camadas OSI (*Open System Interconnection*) da ISO (*International Organization for Standardization*), permitindo que a supervisão do transporte de informações seja feita através de camadas hierarquizadas [51].

A SDH foi projetada basicamente para transportar o tráfego telefônico, com isso há muita ineficiência para o transporte de dados nesse sistema. Com o surgimento e a popularização das redes de pacotes, em especial a Ethernet, os sistemas SDH foram sendo adaptados para realizar o transporte também desse tipo de tráfego. Conseqüentemente, surgiram novos tipos de equipamentos SDH, denominados SDH-NG (*Next Generation*). O SDH-NG permite em teoria a transferência e convivência dos tráfegos TDM e de pacotes, sendo esse último baseado no protocolo IP. Esses equipamentos incluem diversos mecanismos para adaptação do tráfego de dados, entre os quais se destacam [49]:

- *VCAT (Virtual Concatenation)*: é uma técnica de multiplexação inversa, desenvolvida através das recomendações G.707/Y.1322 e G.783 do ITU-T. Ela permite o empilhamento de vários canais independentes de baixa velocidade em um único canal de alta velocidade.
- *LCAS (Link Capacity Adjustment Scheme)*: é um esquema de sinalização que segue as recomendações G.7041/Y.1305 do ITU-T, e que permite a dois pontos de um canal se ajustarem dinamicamente a largura de banda de acordo com requisições vindas do NMS (*Network Management System*) sem interferir no tráfego.

- GFP (*Generic Framing Procedure*): é um protocolo universal de adaptação de sinais, baseado na recomendação G.7041 do ITU-T. Ele utiliza o mapeamento de tráfego de banda larga para convergir o Ethernet, *Fiber Channel* ou qualquer outro tipo de dado de pacote para o SDH ou diretamente para uma rede de transmissão óptica utilizando a tecnologia WDM.

Para as redes de transportes PDH e SDH, a tecnologia TDM permite transmitir simultaneamente vários sinais pois realiza a multiplexação determinística ou síncrona. Mas com o aumento significativo no tráfego de dados e no maior desenvolvimento das tecnologias ópticas, há a necessidade de uma rede para suportar esse aumento, assim, pode-se evidenciar a rede OTN como a evolução destas redes.

### 2.2.3 Rede de Transporte OTN/WDM

A rede OTN é uma evolução da rede SONET/SDH e com a versatilidade *do Wavelength Division Multiplexing* (WDM), elimina a complicação do transporte de dados do *Time Division Multiplexing* (TDM), fornece isolamento de falhas e melhora da resolução de problemas [52].

A rede OTN oferece benefícios como multiplexação mais eficiente e comutação de serviços de alta largura de banda, recursos aprimorados de monitoramento e maior correção antecipada de erros (*Forward Error Correction - FEC*). O FEC permite que erros de *bits* captados durante a transmissão do sinal sejam corrigidos quando o sinal é decodificado. O FEC pode ser usado para compensar condições de transmissão mais severas. Por exemplo, potencialmente permite que mais comprimentos de onda sejam multiplexados em uma única fibra óptica, ou permite que um sinal permaneça no domínio óptico para distâncias mais longas [51].

A OTN fornece uma combinação de transparência e gerenciamento. Sua estrutura de enquadramento, muitas vezes chamada de invólucro digital, pode transportar diferentes protocolos de maneira transparente, sem afetar o conteúdo, os canais de controle ou o tempo. Seus recursos OAM (*Operations, Administration, and Maintenance*) associados fornecem uma visualização gerenciada consistente para uma variedade de serviços. A OTN potencialmente fornece uma camada de convergência para redes ópticas, onde as operadoras podem suportar múltiplos serviços com uma única rede em vez de implantar redes paralelas, sem comprometer as operações resilientes e os recursos de gerenciamento [17].

A OTN é estruturada de forma hierárquica por camadas que são recomendadas e padronizadas pela ITU-T [8], esses parâmetros são definidos considerando uma topologia fim-a-fim de uma rede de fibra óptica funcional. Essas recomendações mostram o sistema de transmissão com uma visão geral, desde o seu protocolo em construção até a terminação em um quadro. Isso é definido pelas recomendações ITU-T G.709, G.805 e G.872. Todas essas padronizações abordam as camadas, funcionalidades e o gerenciamento de todo o transporte do sinal [53]. A OTN possui uma topologia dividida em duas camadas hierárquicas (Figura 2.2): uma representando o transporte óptico, a *Optical Transport Hierarchy* (OTH) e a outra correspondendo a parte digital, a *Digital Transport Hierarchy* (DTH) [54].

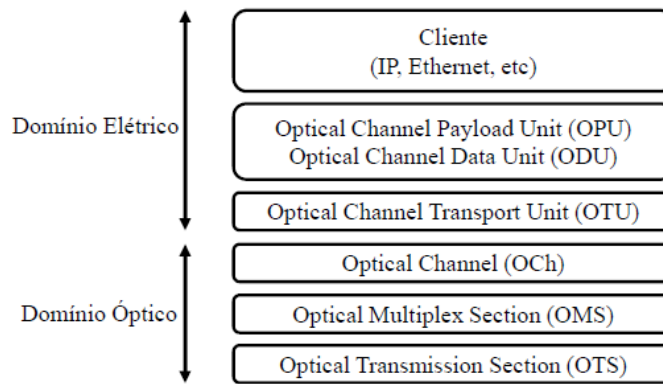


Figura 2.2: Hierarquia rede OTN

Fonte: [54]

A seção de transmissão *Optical Transmission Section* (OTS), multiplexação *Optical Multiplex Section* (OMS), e o canal óptico *Optical Channel* (OCh) estão no domínio óptico. A Figura 2.3 apresenta a estrutura hierárquica no transporte óptico.

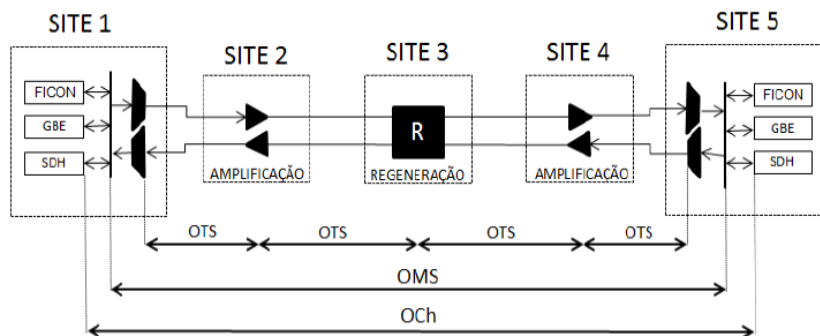


Figura 2.3: Domínio óptico

Fonte: [49]

A camada OCh, é a responsável pela conexão fim a fim entre os canais ópticos alocados em comprimentos de onda ( $\lambda$ ) distintos, em um sistema WDM, permitindo protocolos em STM, *Gigabit Ethernet*, entre outros [49]. A camada OMS é responsável pelo sinal multiplexado com vários comprimentos de onda ( $\lambda$ ), permite ao operador da rede, executar trabalhos de monitoração e manutenção entre os *sites* que contenham *Optical Add-Drop Multiplexer* (OADM), *Reconfigurable Optical Add-Drop Multiplexer* (ROADM), multiplexadores e demultiplexadores ópticos. A camada OTS é responsável pelos pontos onde ocorra tratamento a nível óptico, ou seja, pontos onde o sinal óptico seja regenerado, amplificado por *Erbium Doped Fiber Amplifier* (EDFA) e compensados com módulos de dispersão cromática [55].

A recomendação ITU-T G.709 inclui também, porém no domínio elétrico, um conjunto de subcamadas na hierarquia OTN. Nesta recomendação estão as camadas de transporte *Optical Channel Transport Unit* (OTUk), de dados *Optical Channel Data Unit* (ODUk) e de carga *Optical Channel Payload Unit* (OPUk), onde  $k$  indica a taxa de dados que está sendo transmitida pelo quadro. Estas camadas (OTUk, ODUk e OPUk) são responsáveis por delinear os quadros, prover informações da conexão, monitorar taxa de erro de *bit*, transportar alarmes, estabelecer conexão fim-a-fim, etc. Na Figura 2.4 é possível identificar a formação da estrutura de um quadro OTN, identificando as subcamadas OPUk, ODUk e OTUk [56].

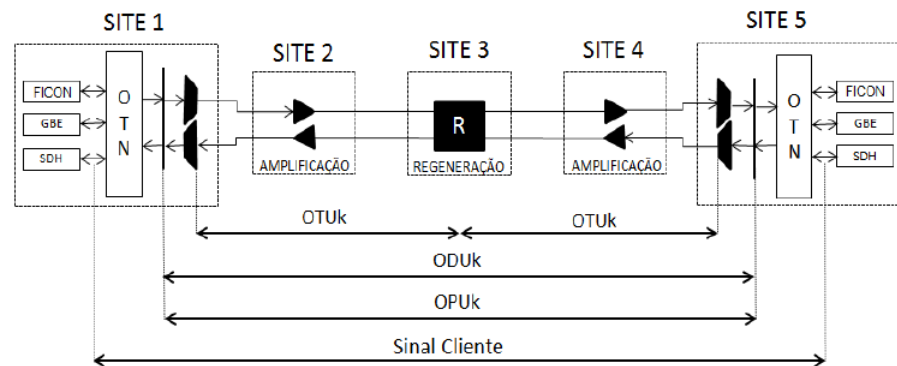


Figura 2.4: Formação de quadro para rede OTN

Fonte: [56]

A Figura 2.5 apresenta como a estrutura em camadas da OTN é usada dentro de uma rede. Sendo  $T$  o ponto de acesso do cliente,  $A$  o amplificador e  $3R$  (*Reamplification, Reshaping and Retiming*) é o elemento de regeneração.

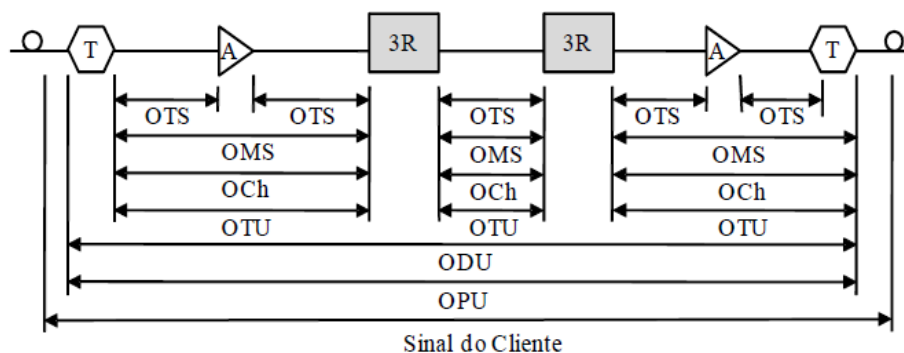


Figura 2.5: Estruturas das camadas da OTN

Fonte: [56]

As taxas de transmissões do OTUk estão apresentadas na Tabela 2.3.

Tabela 2.3: Hierarquia de taxas da rede OTN

Fonte: [56]

OTUk	Taxa de Transmissão Gbps
OTU1	2.666,00
OTU2	10.709,00
OTU3	43.018,00
OTU4	111.810,00
OTU5	~412.000,00

Cada quadro de transporte contém uma ou mais unidades de dados de canal óptico (ODU), onde a ODU é a unidade básica para comutação/multiplexação. A hierarquia do ODU é mostrada na Tabela 2.4.

Tabela 2.4: Hierarquia de comutação/multiplexação da rede OTN

Fonte: [56]

ODU	Taxa de Transmissão Gbps
ODU-Flex (CBR)	~Taxa de bits de sinal do cliente
ODU-Flex (GPF)	$N \times 1.25$
ODU0	1.244,00
ODU1	2.499,00
ODU2	10.037,00
ODU3	40.319,00
ODU4	104.794,00

ODU-Flex é a adição mais recente à hierarquia do ODU, para permitir que a OTN seja utilizada como um mecanismo de transporte eficiente para uma gama mais ampla de taxas de dados e serviços. ODU-Flex vem em dois tipos, com o ODU-Flex-*Generic Framing Procedure* - GFP, um número apropriado de slots tributários ODU $k$  ( $k$  pode ser de 2 a 4) são alocados para o serviço, onde cada slot tributário corresponde a aproximadamente 1,25 Gbps (a taxa tributária exata depende de  $k$ ). Por exemplo, quatro *slots* tributários ODU2 seriam alocados para transportar uma conexão *Fibre Channel* (4G FC) de 4 Gbps. Além do ODU-Flex-GFP, há a taxa de *bits* ODU-Flex-Constante (CBR), em que a sobrecarga de ODU é agrupada nos dados do cliente para transportar uma conexão arbitrária de taxa de *bits* [56].

Os modelos de otimização aqui tratados com esse tipo de rede, buscam minimizar o custo de implantação da rede de transporte considerando os custos de implantação da rede óptica e de equipamentos do sistema de transmissão.

## 2.3 Programação Linear

A programação linear está preocupada com a otimização (minimização ou maximização) de uma função linear, com um número finito de variáveis, desde que satisfaça um conjunto de restrições de igualdade ou desigualdade. Estas restrições podem ser de origem financeira, tecnológica, organizacional ou outras. A programação linear tenta resolver problemas de otimização nos quais a função objetivo e as restrições são todas lineares [57]. A seguir é formulado um problema de programação linear. Qualquer tipo de problema geral de programação linear pode ser apresentado desta forma. Uma definição generalista de um problema de otimização linear para minimização é descrita pelas Equações (2.1), (2.2) e (2.3).

$$\text{Minimizar } f(x) = c^T \cdot x \quad (2.1)$$

$$\text{Sujeito a: } Ax = b \quad (2.2)$$

$$x \geq 0 \quad (2.3)$$

Onde:

$f(x)$	Função objetivo;
$x$	Variáveis de decisão;
$b$	Lado direito das restrições;
$c$	Coefficiente da função objetivo;
$A$	Matriz A.

A função objetivo e os coeficientes do sistema de equações lineares conforme apresentados nas Equações (2.1), (2.2) e (2.3), são relevantes para a solução do problema e podem ser descritos da seguinte forma:

$$\begin{aligned} x &= [x_1, x_2, x_3, \dots, x_n] && \text{variáveis de decisão} \\ c &= [c_1, c_2, c_3, \dots, c_n] && \text{coeficientes da função objetivo} \\ A &= [a_1, a_2, a_3, \dots, a_n] && a_j \text{ é a } j\text{-ésima coluna da matriz } A \end{aligned}$$

A função objetivo expressa o principal objetivo buscado de maximizar ou minimizar. O objetivo é encontrar a combinação de fatores que proporcione o melhor desempenho possível para o sistema em questão, respeitando as restrições. Tem-se o objetivo de maximizar quando a função se referir a lucro, receita, ganhos, etc, e de minimizar quando a função se referir a custos, riscos, perdas etc. As variáveis de projeto e as restrições dependem do caso que está em estudo. Para telecomunicações um modelo geral poderia apresentar a estrutura apresentada na Figura 2.6.

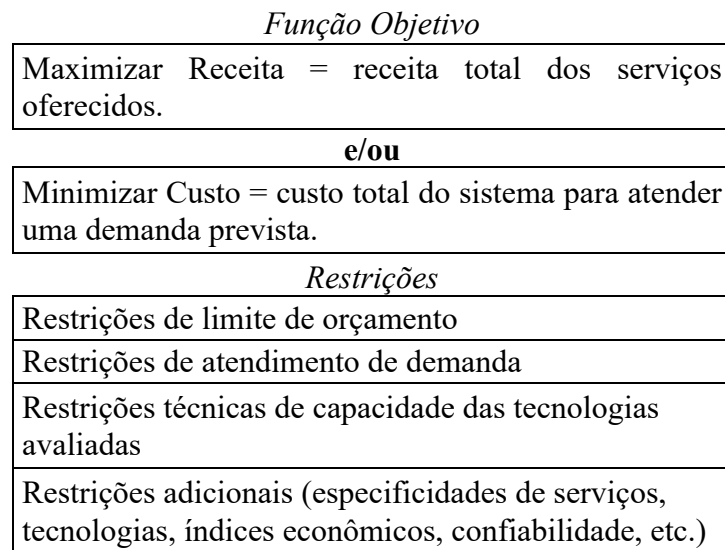


Figura 2.6: Estrutura geral de modelagem.

Na programação linear, existem condições necessárias e suficientes de otimização que podem ser utilizadas para testar se uma dada solução viável é uma solução ótima ou não. Estas condições têm sido utilizadas para desenvolver métodos algébricos tais como o Simplex e outros métodos para resolver problemas da programação linear [57]. A programação linear juntamente com a disponibilidade de técnicas de solução programável como o método Simplex, descrito por [58] e o método de *branch-and-bound* que foi desenvolvido a partir do trabalho de [59], facilita sua aplicação. Estas técnicas são amplamente utilizadas, pois possuem habilidades para modelar

importantes e complexos problemas de decisão. A descrição do método Simplex pode ser encontrada em [60]. O método *branch-and-bound* é amplamente aplicado em otimização combinatorial, quando existem vários caminhos para um objetivo e se quer um caminho ideal, com menor custo, por exemplo.

Alguns problemas requerem o uso de variáveis que assumem somente valores inteiros e quando isso ocorre tem-se um problema de programação linear inteira (ILP). Diversos modelos práticos de programação linear inteira restringem algumas variáveis inteiras para valores “0” ou “1”. Já o modelo de programação linear inteira mista (MILP) possui variáveis contínuas e discretas que devem satisfazer um conjunto de restrições lineares de igualdade e desigualdade. O esforço computacional envolvido nesse tipo de problema está nas variáveis inteiras binárias [61].

Diferentes problemas de otimização têm sido propostos na literatura para encaminhamento de tráfego em redes ópticas utilizando programação linear [61] [62], programação linear inteira [37] [38] [63], ou programação linear inteira mista [23] [64]. O objetivo desses problemas de otimização é estabelecer todas as solicitações de conexão, atendendo as demandas previstas, utilizando um número mínimo de recursos de rede (por exemplo, a rede óptica, amplificadores, regeneradores, etc). Os problemas de otimização, tanto para a programação linear inteira, ou programação linear inteira mista, são conhecidos como NP-completos, que são computacionalmente difíceis de resolver [65].

Nos modelos matemáticos propostos para o planejamento de redes de transporte pode-se dividir as variáveis de decisão em dois conjuntos:

- Variáveis de equipamentos: cada uma delas corresponde à decisão de alocar (ou não) e dimensionar os equipamentos em cada arco (ou nó) da rede. São do tipo binário (0 ou 1) e, para o padrão de sistemas avaliados aqui, podem ser redes de pequeno, médio ou grande porte.
- Variáveis de fluxo de demanda: modelam o caminho percorrido pela demanda desde o nó fonte até o nó de destino e são do tipo real.

Muitos problemas envolvendo grafos estão relacionados com a atribuição de capacidade aos arcos e a distribuição do fluxo, como, por exemplo, problemas de otimização de redes (água, gás, dados). Uma determinada demanda precisa sair de um nó (fonte) e chegar até outro nó (destino) contido no conjunto  $V$  de vértices. A forma que essa demanda é tratada no processo de modelagem podendo apresentar duas formulações distintas: a formulação nó-arco e arco-caminho.

Elas são diferenciadas pela representação do fluxo na rede. Em termos de estrutura algébrica, a matriz de incidência (representa matematicamente um grafo através de uma matriz bidimensional, onde uma dimensão são os vértices e a outra são as arestas) é a principal diferença entre as formulações [57].

Um grafo é um objeto da forma  $(V, E)$ , onde  $V$  é um conjunto finito e  $E$  é um conjunto de pares ordenados de elementos de  $V$ . Os elementos de  $V$  são chamados vértices (nós) e os elementos de  $E$  são chamados arcos. Para cada arco  $(u, e)$ , os vértices  $u$  e  $e$  representam a ponta inicial e a ponta final de  $(u, e)$ , respectivamente. Um caminho é um passeio sem vértices repetidos.

É utilizada uma rede simples, que consiste em três nós (Figura 2.7) para entendimento das formulações, onde cada nó está conectado a outros dois nós, isto é, a topologia da rede se parece com um triângulo.

### 2.3.1 Formulação Nó-Arco

Essa formulação baseia-se na conservação de fluxo em todos os nós da rede, assim, existem restrições de escoamento e conservação em todos os nós, por isso esta formulação é mais complexa.

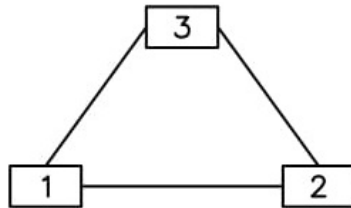


Figura 2.7: Rede com três nós

Nesta formulação há sempre um destino específico. A Figura 2.8 apresenta o fluxo de demanda para a rede de três nós representada na Figura 2.7.

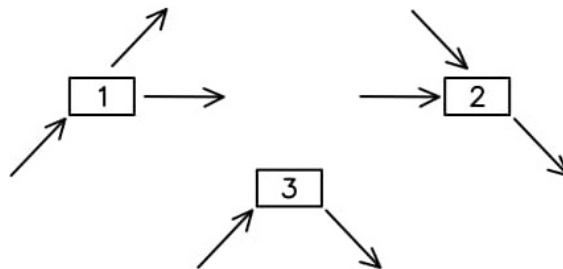


Figura 2.8: Fluxo de demanda

O fluxo total de entrada considerado no nó é igual ao fluxo total de saída a partir do nó. Isto é chamado de lei de conservação do fluxo. Esta formulação, devido ao uso de fluxos de ligação e as restrições de escoamento de conservação nos nós, é conhecida como a formulação nó-arco.

### 2.3.2 Formulação Arco-Caminho

A matriz de incidência na formulação arco-caminho é formada a partir da definição de conjuntos de rotas (caminhos), formada por rotas pré-estabelecidas. A Figura 2.9 apresenta as possibilidades de rotas para a rede de três nós representada na Figura 2.7. Nos problemas de roteamento várias demandas precisam ser escoadas ao mesmo tempo, assim é escolhido um caminho para que cada demanda saia do seu nó de origem e chegue até o seu nó de destino.

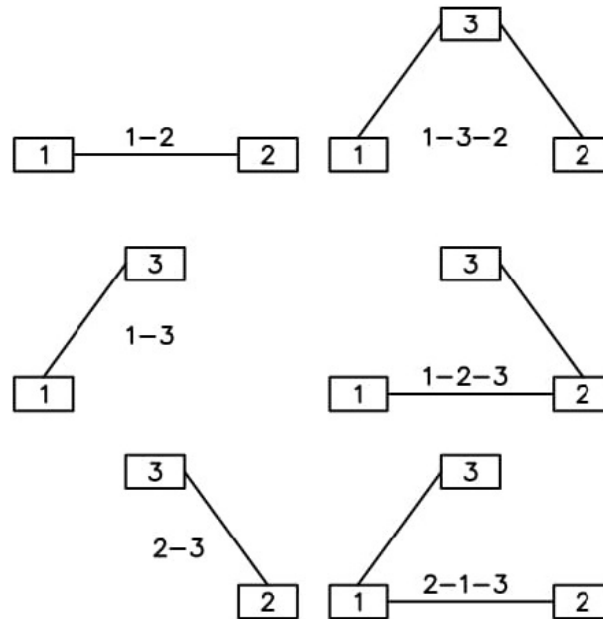


Figura 2.9: Possibilidades de caminhos para rede de três nós

Nesta formulação, múltiplas demandas precisam ser encaminhadas na rede ao mesmo tempo e competem os recursos disponíveis (capacidades dos *links* (arcos)). A restrição relativa à escolha dos caminhos pode ser feita de duas formas diferentes: uma para quando os arcos possuem capacidade definidas, e outra para quando a capacidade precisa ser alocada no arco. A solução ótima pode divergir com a utilização de uma ou outra formulação, uma vez que as rotas ótimas podem estar fora do conjunto de caminhos escolhidos na abordagem arco-caminho [66]. A formulação arco-caminho abrange todos os problemas de projeto na versão atual do SNDlib [19].

A geração do conjunto de caminhos pode ser realizada utilizando-se a forma manual, ou seja, contando com a experiência do planejador. Este procedimento procura valorizar a experiência do planejador no processo decisório, através do seu conhecimento da rede, ao escolher os arcos que compõem um determinado caminho candidato. Outra maneira é a geração de forma automática utilizando, por exemplo, o critério de caminho mais curto. Sendo assim, a distância total

compreendida entre o nó de origem e o nó de destino, é utilizada como fator de decisão. O algoritmo utilizado nesse trabalho é o algoritmo de *k-caminhos* mais curtos [67] e a formulação é a arco-caminho. Este algoritmo é tratado na Seção 2.3.3.

### 2.3.3 Algoritmo *k*-Caminhos

O problema do caminho ótimo é bem conhecido e muitas variantes deste problema têm sido propostas na literatura, sendo o problema de caminho mais curto um dos mais estudados. A escolha dos *k-caminhos* mais curtos *k* é um problema de otimização bem conhecido cuja finalidade é classificar *k-caminhos* entre um determinado par de nós em uma rede. Quando o objetivo é classificar os caminhos sem nós repetidos, o problema é conhecido como classificação dos caminhos sem *loop* mais curtos. Neste trabalho, é apresentada uma implementação do algoritmo de caminhos sem *loop* mais curtos do Yen [68].

O algoritmo do Yen utiliza duas listas, ou seja, lista *A* (caminhos permanentes mais curtos da origem ao destino - ordenados cronologicamente) e lista *B* (caminhos mais curtos experimentais - candidatos). No início, é necessário encontrar o primeiro caminho mais curto da origem até o destino usando qualquer algoritmo bem adaptado de caminho mais curto, no caso o Dijkstra [69]. Em seguida, explora-se a ideia de que os *k*-ésimos caminhos mais curtos podem compartilhar arestas e subcaminhos (caminho da fonte até quaisquer nós intermediários dentro da rota) do caminho mais curto. Assim apanha-se o caminho mais curto e faz com que cada nó da rota fique inacessível por sua vez, isto é, remover um arco particular que vai para o nó dentro da rota.

Quando o nó estiver inacessível, faz a localização do caminho mais curto do nó anterior até o destino. Assim uma nova rota que é criada anexada ao subcaminho comum (da origem ao nó anterior do nó inacessível) e adiciona-se o novo caminho mais curto do nó anterior ao destino. Esta rota é então adicionada à lista *B*, desde que não tenha aparecido na lista *A* ou na lista *B* anteriormente. Depois de repetir isso para todos os nós na rota, é necessário encontrar a rota mais curta na lista *B* e movê-la para a lista *A*. Este processo se repete por *k* vezes.

O algoritmo Dijkstra considera um conjunto *S* de menores caminhos, iniciado com um nó inicial *i*. A cada passo do algoritmo busca-se nas adjacências dos nós pertencentes ao conjunto *S* de caminhos aquele nó com menor distância relativa ao nó inicial e adiciona-o a *S* e, então, repetindo os passos até que todos os nós alcançáveis por *i* estejam em *S*. Arcos que ligam vértices já pertencentes a *S* são desconsideradas.

A ferramenta computacional implementada neste trabalho para a geração automática de *k-caminhos* utiliza como dado de entrada o comprimento dos *links* candidatos na rede. Estes comprimentos podem ser oferecidos pelo planejador (caso os tenha) ou pode ser oferecida a localização geográfica dos nós da rede, que a ferramenta calcula a distância euclidiana dos *links*. Na rede da SNDlib, as informações disponíveis são as coordenadas geográficas. Na rede OTN/WDM, o planejador já possui os comprimentos dos *links* candidatos.

## 2.4 Modelagem Fuzzy

Os modelos matemáticos que podem ser desenvolvidos para o planejamento da rede de transporte são fortemente dependentes de dados de demanda. Entretanto, muitos destes dados não são precisamente conhecidos no momento da confecção do plano. Isto acontece não somente com a demanda, mas também com outros dados necessários aos modelos. Naturalmente, esta incerteza pode influenciar a maneira pela qual o plano é obtido. Desta forma, espera-se do plano que ele seja robusto, isto é, o plano deve continuar rentável, mesmo que as previsões de demanda sejam imprecisas. Portanto, o planejador precisa de sistemas de apoio à decisão que sejam capazes de lidar com imprecisão. Essa imprecisão pode ser tratada com conceitos de conjuntos nebulosos (conjuntos *fuzzy*) e números nebulosos (números *fuzzy*) [70].

Um conjunto (ordinário) pode ser caracterizado pela sua função característica (de pertinência). Por exemplo, o “conjunto A dos números reais estritamente maiores que zero” pode ser expresso pela Equação (2.4).

$$\mu_A(a) = \begin{cases} 0, & \text{se } a \leq 0 \\ 1, & \text{se } a > 0 \end{cases} \quad (2.4)$$

com  $a \in \mathbf{R}$ , onde  $\mathbf{R}$  é o conjunto dos números reais.

Um conjunto é definido como *fuzzy* quando sua função de pertinência não apresenta, necessariamente, somente valores 0 ou 1. Por exemplo, o “conjunto  $\tilde{A}$  dos números reais muito maiores que zero” pode ser expresso pela Equação (2.5).

$$\mu_{\tilde{A}}(a) = \begin{cases} 0, & \text{se } a \leq 0 \\ \frac{a}{10}, & \text{se } 0 < a \leq 10 \\ 1, & \text{se } a > 10 \end{cases} \quad (2.5)$$

com  $a \in \mathbf{R}$ . Esta função não é a única para o conjunto  $\tilde{A}$ , sua definição é subjetiva.

Conjuntos *fuzzy* são propícios para representar situações em que é possível (ou necessário) distinguir valores com maior ou menor possibilidade de ocorrência. Um conjunto *fuzzy* é normalizado quando pelo menos um de seus elementos possui o máximo valor de pertinência (sendo este valor máximo igual a 1). Um  $\alpha$ -corte de um conjunto *fuzzy*  $\tilde{A}$  é um conjunto ordinário  $A_\alpha$  que contém todos os elementos de  $\tilde{A}$  com valor de pertinência igual ou superior ao valor  $\alpha$ .

A lógica *fuzzy* pode ser definida como a lógica que suporta os modos de raciocínio que são aproximados ao invés de exatos. A lógica *fuzzy* é uma ferramenta capaz de capturar informações vagas, em geral descritas em uma linguagem natural e convertê-las para um formato numérico de fácil manipulação por sistemas computacionais [71]. O objetivo da lógica *fuzzy* é gerar uma saída lógica a partir de um conjunto de entradas não precisas até mesmo com ruídos.

A fuzzificação é o processo de transformação da entrada em graus de pertinência ou de certeza no conceito, produzindo uma interpretação da entrada, ou seja, é a transformação de um número ou conjunto da lógica tradicional em um conjunto *fuzzy*. A parte mais crítica da construção de um modelo *fuzzy* é justamente a escolha da forma de cada conjunto *fuzzy*, visto que esta determina a correspondência entre os dados de entrada e os seus conceitos linguísticos correspondentes. As funções de pertinência podem assumir diversos formatos, as principais funções matemáticas são: triangular, trapezoidal, gaussiana, Bell generalizada, sigmoideal, polinomial assimétrica, S-*shape*. As funções mais utilizadas são as triangulares e trapezoidais, por serem mais fácil de implementação [72].

A presença de números *fuzzy* nas restrições dos modelos podem alterar substancialmente o procedimento de resolução. Há a necessidade de se transformar os números *fuzzy* de maneira a permitir o seu tratamento. Este processo é denominado “defuzzificação”, e consiste em encontrar um “valor de trabalho” para o número *fuzzy* tratado. Existem vários métodos disponíveis. O trabalho [73] fornecem a referência clássica para o tema. Outros estudos, mais recentes também podem ser citados, como por exemplo os trabalhos [74] [75] [76] [77] [78], em que os autores utilizam programação linear *fuzzy* para realizar o processo de defuzzificação. Alguns destes trabalhos são utilizados como ponto de partida para a modelagem dos dados imprecisos de demanda neste trabalho.

## 2.5 Algoritmos Genéticos

Os Algoritmos Genéticos (GA - *Genetic Algorithm*) foram introduzidos por John Holland através de estudos baseados em processos evolutivos e os apresentou para estudar a adaptação e a evolução relacionando-os ao mundo real [79]. Os algoritmos genéticos vêm sendo usados com sucesso para encontrar boas soluções para uma ampla variedade de problemas de otimização. A aplicação deste algoritmo pode ser encontrada para dimensionamento de rede gás [80], logística [81], para otimização de recursos hídricos [82] [83], em telecomunicações [84] [85] [86]. Aplicações do algoritmo genético programação linear inteira mista podem ser encontradas em [87], que é uma aplicação para rede de acesso em sistemas de telecomunicações e [25] [36] [28] [27] apresentam aplicações para redes ópticas.

Os algoritmos genéticos são métodos de otimização que se originaram dos algoritmos evolucionários. O processo evolutivo de um algoritmo genético inicia-se com a geração (geralmente randômica) de uma população de indivíduos, ou cromossomos, que correspondem a soluções-candidatas do problema. Durante a evolução, alguns indivíduos da população são manipulados por um conjunto de operadores genéticos. O objetivo desse processo que imita a reprodução genética é formar novos indivíduos e aumentar a diversidade da população, ajudando na busca pela melhor solução.

Os indivíduos são então avaliados, segundo uma medida de adaptação, o *fitness*, e os mais bem adaptados são selecionados para a próxima geração e recombinados para formar uma nova população, através do cruzamento (*crossover*), gerando filhos, que ainda podem sofrer um processo de mutação. A condição de parada indica geralmente a existência, na população, de um indivíduo que representa uma solução aceitável para o problema, ou o alcance de um número pré-determinado de gerações [88].

A nova população então é utilizada como entrada para a próxima iteração do algoritmo e a cada geração, a adaptação de cada solução é avaliada através da função *fitness* (aptidão). Os operadores genéticos tais como seleção, cruzamento e mutação são responsáveis por aprimorar a solução no decorrer das gerações do algoritmo [89]. A estrutura básica do algoritmo genético é mostrada na Figura 2.10.

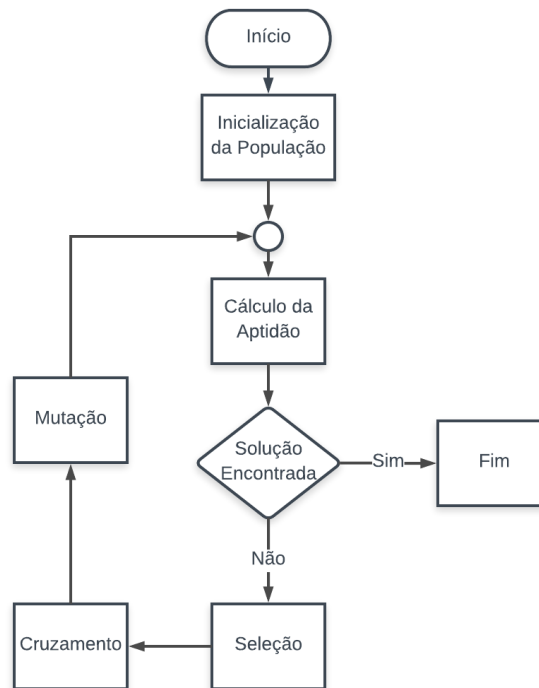


Figura 2.10: Fluxograma de um GA simples

Uma população de  $n$  indivíduos é gerada aleatoriamente, porém, se algum conhecimento prévio a respeito do problema estiver disponível, pode ser utilizado na inicialização da população, especialmente relacionado a restrições. Cada um dos indivíduos da população representa uma possível solução para o problema, ou seja, um ponto no espaço de soluções.

### 2.5.1 Aptidão e Seleção

Estes operadores são fundamentais para que o algoritmo tenha uma convergência com maiores índices de aceitação e possibilite melhores soluções, pois a avaliação dos indivíduos contribuirá para resultados satisfatórios.

Geralmente a aptidão ou função *fitness* é determinada através do cálculo da função objetivo, que depende das especificações de projeto. A aptidão está ligada diretamente com o grau de adaptação de cada indivíduo ao ambiente e está relacionada com a escolha dos mais aptos de forma que ocorra a reprodução passando parte de seu material genético a gerações futuras [89].

A definição da função de avaliação deve considerar a descrição do problema abordado. Se o problema é restrito, é importante escolher uma função que leva em conta as restrições do problema,

evitando gerar indivíduos infactíveis. A função de *fitness* pode incorporar um termo de penalidade, por exemplo.

Essa função é a que determina a qualidade de um indivíduo e é a única ligação verdadeira do programa com o problema real e que não armazena nenhum tipo de informação da solução que se pretende encontrar. A função de avaliação sempre contempla de forma numérica os objetivos do problema [88]. Na fase de seleção os indivíduos mais aptos da geração atual são selecionados. Esses indivíduos são utilizados para gerar uma nova população por cruzamento.

### 2.5.2 Crossover

O *crossover* é o operador pelo qual bons indivíduos repassam suas características para a próxima geração. Em conjunto com o operador de seleção garante que a busca do algoritmo genético não seja totalmente aleatória [90]. O *crossover* mais comum é o de um ponto para codificação binária, onde um indivíduo (cadeia de *bits*) é cortado em um ponto aleatório, e após o corte dois indivíduos têm suas informações cruzadas, produzindo dois novos indivíduos (filhos) que irão compor a próxima geração. Esse cruzamento é conhecido como ponto de cruzamento único.

A Figura 2.11 apresenta o *crossover*, os cromossomos de cada par de indivíduos (pais) a serem cruzados são particionados em um ponto, chamado ponto de corte, sorteado aleatoriamente. Um novo filho é gerado permutando-se a parte inicial de um cromossomo com a parte final do outro. Não é necessário que as duas partes possuam o mesmo tamanho.

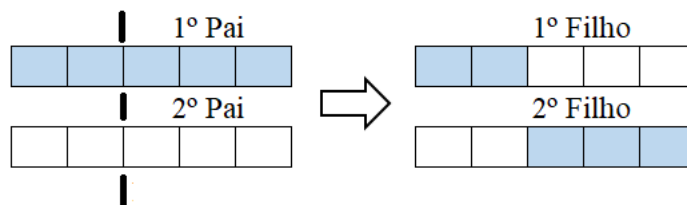
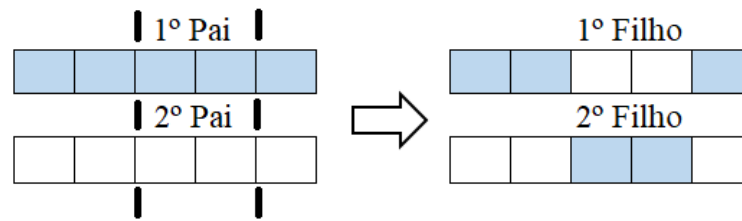
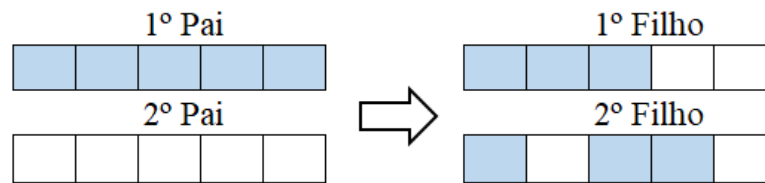


Figura 2.11: Exemplo de *crossover* ponto único

No *crossover* com dois pontos de cruzamento são definidos os dois pontos de cruzamento, a série binária (genes) desde o início do cromossomo até o primeiro ponto de cruzamento é copiada do primeiro pai, a parte do primeiro ponto de cruzamento até o segundo ponto é copiada do outro pai e o resto do cromossomo é copiado do primeiro pai novamente (Figura 2.12).

Figura 2.12: Exemplo de *crossover* dois pontos

Já no cruzamento uniforme os *bits* (genes) são copiados aleatoriamente do primeiro ou segundo pai para os filhos. A Figura 2.13 apresenta um exemplo de cruzamento uniforme.

Figura 2.13: Exemplo de *crossover* uniforme

O operador de *crossover* é um método de compartilhamento de informação entre os cromossomos que combina as características de dois cromossomos pais para formar dois filhos, com a possibilidade de bons cromossomos gerarem filhos melhores. A probabilidade de cruzamento a ser aplicada depende da probabilidade definida por uma taxa de *crossover*, conhecida como probabilidade de cruzamento [91].

Altas taxas de *crossover* provocam uma convergência rápida, mas podem significar perda de estruturas de alta adaptabilidade, ou seja, pode-se descartar soluções com boa chance de alcançar o valor ótimo. Taxas baixas tornam o algoritmo lento. É preciso, portanto, buscar um valor de equilíbrio para a taxa de recombinação.

### 2.5.3 Mutação

A operação de mutação é utilizada para garantir uma maior varredura do espaço de estados e evitar que o algoritmo genético convirja muito cedo para mínimos locais. A mutação é efetuada alterando-se o valor de um gene de um indivíduo sorteado aleatoriamente com uma determinada probabilidade, denominada probabilidade de mutação (deve ser menor que a do *crossover*), ou seja, vários indivíduos da nova população podem ter um de seus genes alterado aleatoriamente.

O operador responsável pela mutação altera arbitrariamente um ou mais componentes (de genes) de um cromossomo selecionado de tal forma a aumentar a variabilidade estrutural da

população. O papel principal da mutação é o de restaurar material genético perdido ou não explorado na população para evitar a convergência prematura do algoritmo genético para soluções abaixo do ideal. Ele certifica que a probabilidade de alcançar qualquer ponto no espaço de busca nunca é zero. A posição de cada cromossomo na população sofre uma mudança aleatória de acordo com uma probabilidade definida por uma taxa de mutação [91].

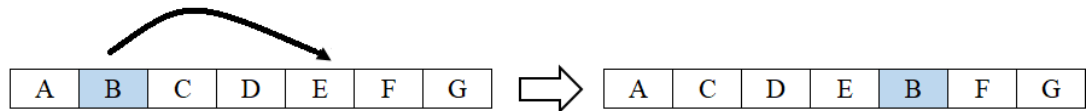


Figura 2.14: Troca de posição de genes

A Figura 2.14 apresenta a mutação fundamentada na troca de posição de um gene qualquer e a Figura 2.15 mostra a mutação baseada na troca de ordem de dois cromossomos [89]. Apesar de ser extremamente importante para uma diversidade extra da população, a probabilidade de ocorrência de mutação deve ser baixa para evitar a destruição do progresso já obtido com a busca. Apesar de baixas, essas taxas são capazes de prevenir estagnação em um valor e possibilitam alcançar qualquer ponto do espaço de busca. Taxas altas de mutação tornam a busca essencialmente aleatória.

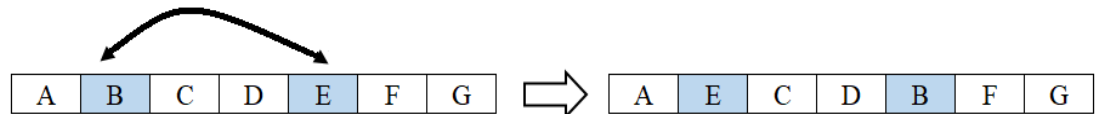


Figura 2.15: Troca de cromossomos

#### 2.5.4 Elitismo

O elitismo não ocorre no processo natural de evolução, por isso é tido como técnica de auxílio à convergência [92]. Vale observar que o melhor cromossomo pode ser perdido de uma geração para outra devido ao corte do crossover ou à ocorrência de mutação. Portanto, é interessante transferir o melhor cromossomo de uma geração para outra sem alterações, esta estratégia é denominada elitismo.

#### 2.5.5 Critérios de Parada

Segundo [93] os critérios de parada são abordagens que delimitam o número de buscas depois que um certo número de gerações são concluídas em um algoritmo genético. Estes critérios

podem ser implementados por meio de um certo tempo máximo, pela diminuição da diversidade populacional ou quando uma população não melhora em sucessivas gerações.

## 2.6 Algoritmo *Firefly*

O Algoritmo *Firefly* (FA - *Firefly Algorithm*) é uma meta-heurística inspirada na natureza para resolver problemas contínuos de otimização, especialmente problemas *NP-hard* e foi motivado pela simulação do comportamento social dos vaga-lumes [94]. É possível utilizá-los para formular algoritmos de otimização, porque o piscar da luz pode ser utilizado de tal forma que esteja associada à função objetivo do problema considerado, a fim de obter soluções ótimas [95]. Em essência, o FA usa as três regras idealizadas a seguir:

- Todos os vaga-lumes são unissex, de modo que um vaga-lume é atraído para outros vaga-lumes, independentemente de seu sexo;
- Atratividade é proporcional ao seu brilho, assim para quaisquer dois vaga-lumes piscando, o menos brilhante se moverá para o mais brilhante. A atratividade é proporcional ao brilho e ambos diminuem à medida que a distância aumenta. Se não houver um mais brilhante que um vagalume em particular, ele se moverá aleatoriamente;
- O brilho de um vaga-lume é afetado ou determinado pelo valor da função objetivo.

Para problemas de maximização, o brilho pode ser proporcional ao valor da função objetivo. Para problemas de minimização, o brilho pode ser o inverso do valor da função objetivo.

No algoritmo *firefly*, há duas questões importantes: a variação da intensidade da luz e a formulação da atratividade. Para simplificação, pode-se sempre supor que a atratividade de um vaga-lume é determinada por seu brilho, que por sua vez está associado à função objetivo codificada. A estrutura básica do algoritmo *firefly* é mostrada na Figura 2.16.

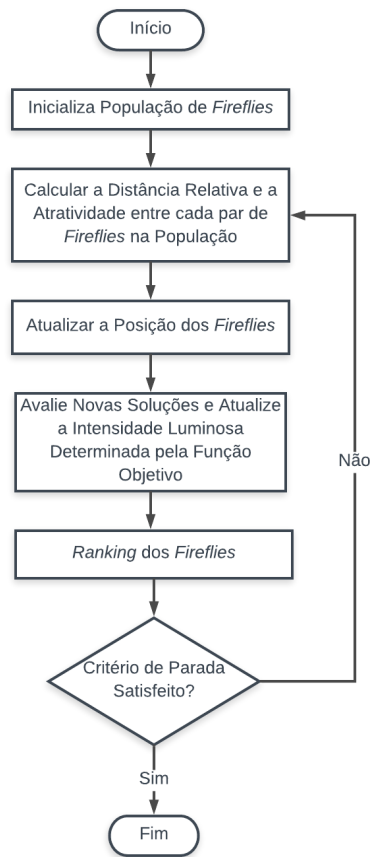


Figura 2.16: Fluxograma de um FA simples

A função de atratividade  $\beta(r)$  pode ser qualquer função monotonicamente decrescente, como a seguinte forma generalizada apresentada pela Equação (2.6). Onde  $\beta_0$  é a atratividade em  $r = 0$  e  $r$  é a distância entre dois vaga-lumes.

$$\beta(r) = \beta_0 e^{-\gamma r^m}, m \geq 1 \quad (2.6)$$

Como geralmente é mais rápido calcular  $1/(1+r^2)$  do que função exponencial [26], a Equação (2.6) pode ser aproximada como a Equação (2.7).

$$\beta(r) = \frac{\beta_0}{1 + \gamma r^2} \quad (2.7)$$

A distância entre quaisquer dois vaga-lumes  $i$  e  $j$ , na posição  $x_i$  e  $x_j$ , respectivamente, pode ser definido como uma distância cartesiana, conforme Equação (2.8), onde  $x_{ik}$  é o componente  $k$  da coordenada espacial  $x_i$  do vagalume  $i$  e  $d$  denota o número de dimensões.

$$r_{ij} = \|x_i - x_j\| = \sqrt{\sum_{k=1}^d (x_{ik} - x_{jk})^2} \quad (2.8)$$

O movimento aleatório de um vaga-lume  $i$  para outro vaga-lume mais brilhante  $j$  é determinado pela Equação (2.9), onde o segundo termo considera a atratividade de um vagalume, o terceiro termo é randômico com  $\alpha$  sendo um parâmetro randômico, e  $\epsilon_i$  é um vetor de números aleatórios extraídos de uma distribuição Gaussiana ou uma distribuição uniforme.

$$x_i = x_i + \beta_0 e^{-\gamma r_{ij}^2} (x_j - x_i) + \alpha \epsilon_i \quad (2.9)$$

De uma forma mais simples,  $\epsilon_i$  pode ser substituído por  $rand - 1/2$ , onde  $rand$  é um gerador de números aleatórios distribuído uniformemente em  $[0,1]$ . Para a maioria das aplicações  $\beta = 1$  e  $\alpha \in [0,1]$  e o coeficiente de absorção de luz  $\gamma$  varia de 0,1 a 10, conforme descrito em [26]. Esse parâmetro ( $\gamma$ ) descreve a variação da atratividade e seu valor é responsável pela velocidade de convergência do FA [26].

### 2.6.1 Firefly Discreto

O FA foi originalmente desenvolvido para resolver problemas de otimização contínua e não pode ser aplicado diretamente para resolver problemas discretos. Os principais desafios para usar o FA para resolver problemas discretos estão no cálculo da distância entre dois vaga-lumes discretos e como eles vão se mover. Neste trabalho, é estendido a discretização proposta em [96].

A distância entre dois vaga-lumes é definida pela distância entre a permutação de suas sequências. Existem duas maneiras possíveis para medir a distância entre duas permutações: (a) distância de Hamming e (b) o número de trocas necessárias da primeira solução a fim de obter a segunda. A distância entre quaisquer dois vaga-lumes  $i$  e  $j$ , nas posições  $x_i$  e  $x_j$ , respectivamente, pode ser medida usando a distância de Hamming. A distância de Hamming entre duas permutações é o número de elementos não correspondentes na sequência [40]. A distância entre duas permutações também pode ser medida usando a distância de troca (*Swap distance*). A distância de *Swap* é o número de trocas mínimas exigidas de uma permutação para obter a outra [97]. Considere as permutações  $\pi_1$  e  $\pi_2$ .

$$\pi_1 = [1 \ 2 \ 3 \ 4 \ 5 \ 6]$$

$$\pi_2 = [1 \ 2 \ 4 \ 3 \ 6 \ 5]$$

Assim, a distância de Hamming ( $\pi_1, \pi_2$ ) é 4 (somente as duas primeiras posições possuem os mesmos elementos). A distância de *Swap* ( $\pi_1, \pi_2$ ) é 2 (no  $\pi_2$  trocou os elementos: 4 com 3 e depois 5 com 6).

Atração e movimento têm que ser implementados e interpretados para o *firefly* discreto mesma forma que é destinado ao algoritmo *firefly* contínuo. Assim o movimento dado na equação (2.9) é dividido em dois sub-passos:  $\beta$ -step e  $\alpha$ -step como apresentado na Equação (2.10) e Equação (2.11), respectivamente.

$$x_i = \beta(r)(x_i - x_j) \quad (2.10)$$

$$x_i = x_i + \alpha(rand - 1/2) \quad (2.11)$$

Os passos de atração  $\beta$  e  $\alpha$  não são intercambiáveis, portanto, o  $\beta$ -step deve ser calculado antes do  $\alpha$ -step enquanto se encontra a nova posição. O  $\beta$ -step traz o vaga-lume iterado sempre mais perto de outro vaga-lume. Em outras palavras, após aplicar o  $\beta$ -step em um vaga-lume em direção ao outro vagalume, sua distância é sempre diminuída, e o decréscimo é proporcional à sua distância anterior. Para isso utiliza-se a distância de Hamming como a função de distância, isso significa que, para a permutação chegar mais perto à outra permutação, a quantidade de seus elementos comuns tem que aumentar. No processo  $\beta$ -step, primeiramente extrai o que é comum em ambos os vagalumes. Por exemplo, deseja-se  $\pi_1 = [4 \ 9 \ 3 \ 7 \ 6]$  seja atraído para  $\pi_2 = [4 \ 1 \ 3 \ 2 \ 6]$ , o resultado  $\pi_{1 \rightarrow 2}$  após o primeiro passo seria:

$$\pi_1 = [4 \ 9 \ 3 \ 7 \ 6]$$

$$\pi_2 = [4 \ 1 \ 3 \ 2 \ 6]$$

$$\pi_{1 \rightarrow 2} = [4 \ \_ \ 3 \ \_ \ 6]$$

Em segundo lugar, há a necessidade de preencher as lacunas  $\pi_{1 \rightarrow 2}$  em relação à distância anterior das permutações. Isto pode ser alcançado com a probabilidade  $\beta = \frac{1}{1 + \gamma \cdot d_{\pi_1, \pi_2}^2}$  onde  $d_{\pi_1, \pi_2}$  é a distância de Hamming ( $\pi_1, \pi_2$ ). Através da probabilidade  $\beta$  é inserido em  $\pi_{1 \rightarrow 2}$  um elemento de  $\pi_1$  ou  $\pi_2$ . Após o cálculo de  $\beta$  um número aleatório  $rand()$  é gerado no intervalo de  $[0,1]$ . Se  $rand() \leq \beta$  então a inserção é realizada com o elemento de  $\pi_1$ , caso contrário de  $\pi_2$ . Esse processo é realizado até o preenchimento de todas as lacunas do  $\pi_{1 \rightarrow 2}$ . Vale ressaltar que após cada

preenchimento, deve ser verificado a nova distância para a inserção da próxima lacuna. Um exemplo com a inserção dos elementos em  $\pi_{1 \rightarrow 2}$  é apresentado a seguir:

$$\begin{aligned}\pi_1 &= [4 \mathbf{9} 3 7 6] \\ \pi_2 &= [4 1 3 \mathbf{2} 6] \\ \pi_{1 \rightarrow 2} &= [4 \_ 3 \_ 6] \\ \pi_{1 \rightarrow 2} &= [4 \mathbf{9} 3 \mathbf{2} 6]\end{aligned}$$

Após realizar o cálculo da probabilidade e a comparação com o número aleatório sorteado, a primeira lacuna foi preenchida pelo elemento de  $\pi_1$  (9) e a segunda com o elemento de  $\pi_2$  (2). Com a formação completo do vetor  $\pi_{1 \rightarrow 2}$  é realizado o  $\alpha$ -step, que é mais simples que o  $\beta$ -step. Este passo permitirá mudar os elementos do vetor, formado pelos elementos vizinhos. A menor troca corresponde a de dois elementos, portanto, todos os vizinhos estão distantes do vaga-lume repetido sempre por 2 unidades de distância.

Existem duas maneiras de se aplicar o  $\alpha$ -step: fazer um  $\alpha$ . *Random()* para realizar muitas trocas de dois elementos escolhidos aleatoriamente, ou escolher muitos elementos através de  $\alpha$ . *Random()* e embaralhar suas posições. A primeira opção é mais fácil de implementar, mas os resultados não são tão abundantes quanto o segundo [98]. O parâmetro  $\alpha$  representa um passo máximo permitido para a permutação, que consiste em  $n$  elementos, para realiza-lo há a necessita que  $\alpha$  seja do conjunto  $\{1, \dots, n\}$ . Então  $\alpha = 1$  significa que nenhuma etapa é feita e  $\alpha = n$  significa embaralhar todos elementos do vetor. Para esclarecer, a distância de Hamming  $\pi$  do  $\pi_{novo}$ , que foi criado a partir de  $\pi$  pelo  $\alpha$ -step, é sempre  $\leq \alpha$ .

## 2.7 Comentários Finais

Neste capítulo, pôde-se observar as evoluções das redes de transportes ópticas, com destaque a rede OTN sendo o passo atual dessa evolução. Também foram discutidos conceitos de programação linear com suas possíveis formulações (nó-arco ou arco-caminho), destacando a importância da geração dos caminhos candidatos (pelo operador da rede ou via algoritmo) para a resposta do modelo. As técnicas de inteligência artificial, lógica *fuzzy* (imprecisão), algoritmo genético e *firefly*, que são utilizadas para deixar os sistemas de apoio à decisão mais flexíveis e realistas, foram apresentadas e discutidas. A metodologia utilizada para gerar os modelos MILP e

ILP com dados imprecisos e com técnicas de resolução bio-inspiradas, para o problema de planejamento da rede de transporte óptica, podem ser conferidas no Capítulo 3.

---

## Capítulo 3. O MODELO GERAL DE PROGRAMAÇÃO LINEAR INTEIRA 0-1 PARA REDE DE TRANSPORTE ÓPTICAS

---

Este capítulo apresenta os modelos ILP e MILP propostos neste trabalho para auxiliar na tomada de decisão de problemas de implantação de redes de transporte ópticas com várias demandas previstas, utilizando a técnica de modelagem arco-caminho. Uma situação corriqueira em um ambiente de planejamento estratégico é que nem sempre o planejador tem em mãos todos os dados necessários para desenvolver as suas atividades. Fazer um levantamento de campo em que se consiga valores exatos para os dados de demanda, tarifa e custo é praticamente impossível. Diante desse cenário, e com o objetivo de permitir maior flexibilidade na aplicação dos modelos, também são propostas técnicas de modelagem e de resolução para os dados imprecisos de demanda (Seção 3.3). As Seções 3.4 e 3.5, respectivamente, descrevem o Algoritmo Genético (GA) e o Algoritmo *Firefly* (FA) propostos para a resolução dos modelos ILP, que são utilizados para dimensionar as redes de transporte ópticas. As contribuições deste trabalho na criação de um algoritmo híbrido GA-FA para a solução do problema em estudo são destacadas na Seção 3.7.

### 3.1 Representação Gráfica da Rede

Esta seção serve como referência para uma definição no problema de planejamento de redes utilizando a abordagem arco-caminho. O modelo de fluxo em rede (grafos) é utilizado para representar o problema de planejamento de rede. A Figura 3.1 representa este grafo e indica alguns elementos desta representação.

Os nós do grafo representam os centros de comutação e gerência e são os geradores (fonte) e/ou receptores (destino) de demandas. Os arcos podem ser providenciados pelas fibras ópticas e os equipamentos de transmissão que se localizam em suas extremidades. Estes equipamentos e as fibras formam topologias elementares, às quais são associados um custo e a capacidade de transporte.

Os principais elementos desta abordagem arco-caminho são:

#### **Nós de Demanda**

Os nós de demanda são pontos concentradores e geradores de demanda (especificada, por exemplo, em número de canais E1 ou em *Gbps*) para o atendimento dos usuários do sistema. Estes nós devem estar fisicamente associados a um equipamento de transmissão. Cada nó é identificado por um número  $[i]$ . A rede exemplo da Figura 3.1 possui cinco nós de demanda e sete *links*.

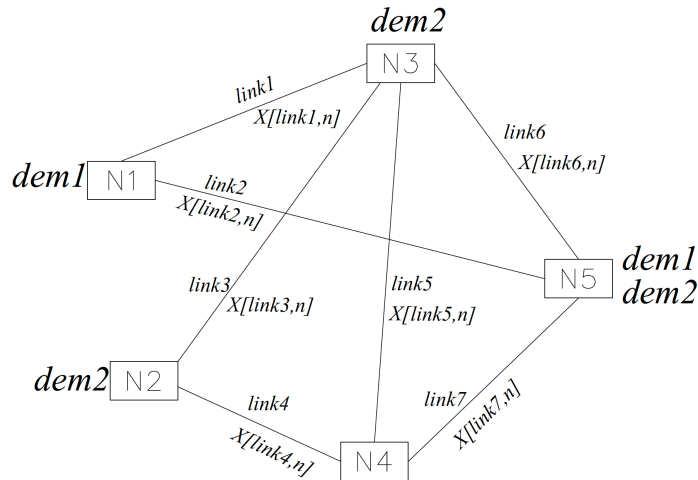


Figura 3.1: Topologia rede arco-caminho

### Demanda Prevista

Um dos objetivos do dimensionamento da rede é atender a demanda prevista entre os nós da rede. A demanda prevista deve ser especificada, por exemplo, em canais E1, ou *Gbps*. Cada demanda prevista é modelada através de um nó que representa o nó de origem, acrescido de um ou mais nós que atuam como possíveis destinos de escoamento desta mesma demanda. Na rede exemplo estão indicados dois possíveis dados de demanda prevista:

*dem1*: Demanda prevista para ser atendida entre o nó de origem 1 e o nó de destino 5;

*dem2*: Demanda prevista para ser atendida entre o nó de origem 2 e o nó de destino 3 ou 5.

### Links (arcos) Candidatos

Cada *link* da rede representa a ligação entre dois nós de demanda. O fluxo de demanda escoado pelos *links* é utilizado para garantir o atendimento das necessidades de demanda entre os nós da rede. Os *links* de escoamento de demanda que ligam todos os nós de demanda entre si são identificados por um nome e um índice, tal como *link2*, que identifica o *link* que liga os nós de demanda 1 e 5.

A capacidade total de cada *link*, representada pela capacidade dos equipamentos de transmissão alocados, deve ser capaz de atender o fluxo de demanda escolhido para ser escoado por aquele *link*. A alocação e escolha da capacidade de cada *link* está representada por uma variável de

decisão binária como, por exemplo,  $X_{[link2,n]}$ , que representa a escolha (ou não) de um sistema de transmissão de modularidade  $[n]$  para ser alocado no  $link2$ .

### Caminhos Candidatos

Um caminho é definido por uma sequência de nós adjacentes sem repetição por onde um fluxo de demanda pode passar, sendo que cada fluxo de demanda pode utilizar um ou mais caminhos distintos. Neste trabalho, são avaliados cenários com e sem exclusividade de alocação de caminhos para o escoamento da demanda, conforme os modelos MILP e ILP descritos nas seções 3.2 e 3.3, respectivamente.

Para cada demanda prevista entre dois nós da rede, é especificado um conjunto de caminhos que podem ser utilizados para escoar a demanda desde o seu nó de origem até o seu possível nó de destino. Para a rede exemplo da Figura 3.1, onde estão especificadas duas demandas, os possíveis conjuntos de caminhos para atender as demandas  $dem1$  e  $dem2$  estão indicados na Tabela 3.1.

Tabela 3.1: Escoamento de demanda

Demanda	Origem	Destino	Caminhos	Links
$dem1$	$N1$	$N5$	$p_1$	$link2$
			$p_2$	$link1 \rightarrow link6$
$dem2$	$N2$	$N3$	$p_1$	$link3$
			$p_2$	$link4 \rightarrow link5$
			$p_3$	$link4 \rightarrow link7 \rightarrow link6$
	$N5$	$p_1$	$link4 \rightarrow link7$	
		$p_2$	$link3 \rightarrow link6$	
		$p_3$	$link4 \rightarrow link5 \rightarrow link6$	

A Tabela 3.1 indica a possibilidade de duas configurações de atendimento para cada demanda prevista:

- Configuração de Atendimento 01: a demanda é completamente atendida por um único caminho. Por exemplo, a demanda  $dem1$  pode ser totalmente atendida ou pelo caminho  $p_1$  ou pelo caminho  $p_2$ .
- Configuração de Atendimento 02: a demanda pode ser atendida por mais de um caminho. Por exemplo, a demanda  $dem1$  pode ter uma parcela escoada pelo caminho  $p_1$  e a sua outra parcela restante escoada pelo caminho  $p_2$ .

Esta escolha é feita através de variáveis de decisão  $Y_{[caminho,demanda]}$ , que especificam a parcela da demanda (por exemplo  $dem1$ ), que será escoada pelo caminho (por exemplo  $p_1$ ). Vale ressaltar que a modelagem proposta contempla a possibilidade de múltiplos destinos conforme

ocorre na *dem2*, onde a demanda total gerada no nó N2 pode ser atendida (nó de destino) tanto pelo N3 ou N5.

### Notação

Os modelos matemáticos propostos fazem uso da seguinte notação:

*LINK*: conjunto formado por todos os arcos da rede, utilizados para interligar os nós de demanda;

*O<sub>LINK</sub>*: conjunto de modularidades (capacidades),  $[n]$ , dos sistemas de transmissão óptica candidatos nos *links*  $[i] \in LINK$ ;

*TN*: conjunto formado pelos possíveis nós de destino para cada demanda de rede. Isso permite avaliar cenários em que cada nó de origem pode ter a demanda atendida por mais de um nó de destino. Para cada nó de origem, um conjunto de *k*-caminhos é gerado para cada nó de destino previsto;

*DEM*: conjunto formado por todas as demandas previstas para serem atendidas pela rede. Cada elemento deste conjunto é formado pela identificação do interesse do tráfego de um nó de origem para o  $[t] \in TN$  possíveis nós de destino;

*P<sub>d</sub>*: conjunto de caminhos candidatos a atender a demanda  $[d] \in DEM$ . Este conjunto deve conter caminhos que permitam o fluxo de demanda  $[d]$  para o  $[t] \in TN$  possíveis nós de destino;

*Ω<sub>i</sub>*: conjunto formado por todos os caminhos que necessitam utilizar o *link*  $[i]$  para escoar o seu fluxo de demanda;

*Y<sub>[j][k]</sub>*: variável utilizada para contabilizar o uso do caminho  $[k] \in P_j$  atender a demanda  $[j] \in DEM$ . Esta variável *Y<sub>[j][k]</sub>* pode ser modelada para assumir valor real ou binário (0 ou 1). A escolha é orientada conforme a avaliação de cenários que exigem, ou não, exclusividade na alocação de caminhos para o escoamento de cada demanda prevista;

*X<sub>[i][n]</sub>*: variável binária (0 ou 1) que indica se o *link*  $[i]$  de capacidade  $[n]$  é ou não escolhido para ser alocado.

*C<sub>[i][n]</sub>*: custo agregado do sistema de transmissão óptica de capacidade  $[n] \in O_{LINK}$ , candidato no *link*  $[i] \in LINK$ . Dependendo da tecnologia utilizada e do comprimento do *link*, este parâmetro pode ser constituído por custos: de rede, de multiplexadores, de *transponders*, de regeneradores, entre outros;

$dem_{[j]}$ : demanda  $[j] \in DEM$  prevista para ser atendida entre um nó de origem e possíveis  $TN$  nós de destino de demanda da rede. Esta demanda pode ser especificada em termos de taxa de transmissão ou em quantidade de um serviço modular padrão;

$Cap_{[n]}$ : capacidades (modularidades),  $[n]$ , dos sistemas de transmissão óptica candidatos. Naturalmente, a especificação deste parâmetro depende da tecnologia adotada;

$r$ : custo médio da rede óptica por  $km$ ;

$l_{[i]}$ : comprimento (em  $km$ ) do link  $[i] \in LINK$ .

### 3.2 Modelo Geral MILP 0-1

O modelo matemático aqui proposto é de Programação Linear Inteira Mista (MILP) 0-1 com a abordagem arco-caminho [57]. O modelo geral MILP 0-1 pode ser formulado conforme o Modelo C3-1. As variáveis  $Y_{[j][k]}$ , no modelo C3-1, são modeladas para assumir valores reais, justificando o nome da formulação MILP. A aplicação do modelo C3-1 é apropriada para aqueles cenários em que não se exige exclusividade de caminho no escoamento das demandas.

#### Modelo C3-1

$$\text{Min} \sum_{[i] \in LINK} \sum_{[n] \in O_{LINK}} C_{[i][n]} X_{[i][n]} \quad (3.1)$$

$$\sum_{[k] \in P_j} Y_{[j][k]} = dem_{[j]} \forall k \in DEM \quad (3.2)$$

$$\sum_{[n] \in O_{LINK}} Cap_{[n]} X_{[i][n]} - \sum_{[k] \in \Omega_i} Y_{[j][k]} \geq 0, \forall [i] \in LINK \quad (3.3)$$

$$\sum_{[n] \in O_{LINK}} X_{[i][n]} \leq 1, \forall [i] \in LINK \quad (3.4)$$

A função objetivo (3.1) se refere ao custo mínimo gerado pela implantação da rede. É calculada somando-se os custos dos sistemas de transmissão óptica escolhidos para o escoamento da demanda entre os nós da rede. O produto  $C_{[i][n]} X_{[i][n]}$  contabiliza este custo quando a variável  $X_{[i][n]}$  assume valor 1 (um).

As restrições de balanço de demanda (3.2) estão previstas para cada demanda prevista para ser atendida na rede. Elas garantem que o somatório dos fluxos de demanda dos caminhos candidatos para atender uma determinada demanda seja igual ao valor previsto para esta demanda.

As restrições de capacidade técnica (3.3) ocorrem em cada *link* previsto pelo planejador para o escoamento das demandas. Elas asseguram que a capacidade do sistema de transmissão alocado num *link* seja suficiente para escoar todo o fluxo de demanda que utiliza aquele *link*. Este conjunto de restrições podem necessitar de ajustes para modelar algumas especificidades da tecnologia utilizada no sistema de transmissão óptica.

O conjunto de restrições de exclusividade (3.4) assegura que apenas um sistema de transmissão óptica deve ser alocado em cada *link*. O objetivo é privilegiar o ganho de escala comumente praticado no mercado, evitando buscas desnecessárias por soluções que utilizem *links* paralelos. Naturalmente, a utilização deste conjunto de restrições pode se dar de forma facultativa, conforme os interesses do planejador.

A escalabilidade do modelo MILP é comprometida pela sua complexidade, de acordo com o número de variáveis (principalmente as binárias) e restrições requeridas. Admitindo um cenário de pior caso, onde todas as demandas podem ser atendidas cada uma por *k*-caminhos factíveis, através de *links* que apresentam todas as modularidades candidatas, o número de variáveis requeridas é  $(|LINK| \times |OLINK| + |DEM| \times k)$ . Já a quantidade de restrições é dada por  $(|DEM| + 2 \times |LINK|)$ .

### 3.3 Modelo Geral ILP 0-1

O outro modelo matemático proposto neste trabalho é de Programação Linear Inteira 0-1, também com a abordagem arco-caminho. O modelo geral ILP 0-1 pode ser formulado conforme o Modelo C3-2. As variáveis  $Y_{[j][k]}$ , no modelo C3-2, são modeladas para assumir valores inteiros binários (0-1). No Modelo C3-2, todas as variáveis são binárias, justificando o nome da formulação ILP. A aplicação do modelo C3-1 é apropriada para aqueles cenários onde há a exigência de exclusividade de caminho no escoamento de cada demanda prevista. O modelo geral ILP 0-1 pode ser descrito pelas seguintes equações:

## Modelo C3-2

$$\text{Min} \sum_{[i] \in LINK} \sum_{[n] \in OLINK} (C_{[i][n]} + r \cdot l_{[i]}) X_{[i][n]} \quad (3.5)$$

$$\sum_{[n] \in OLINK} Cap_{[n]} X_{[i][n]} - \sum_{[k] \in \Omega_i} dem_{[j]} Y_{[j][k]} \geq 0, \forall [i] \in LINK \quad (3.6)$$

$$\sum_{[k] \in P_j} Y_{[j][k]} = 1 \forall [j] \in DEM \quad (3.7)$$

$$\sum_{[n] \in OLINK} X_{[i][n]} \leq 1, \forall [i] \in LINK \quad (3.8)$$

A função objetivo (3.5) é equivalente à função objetivo (3.1) do modelo MILP. A única diferença é que aqui o custo da tecnologia com possibilidade de ser alocada em cada *link* está modelada de forma distinta, com uma parcela representado o custo do sistema de transmissão e outra parcela o custo de rede.

Devido a modelagem inteira binária para as variáveis  $Y_{[j][k]}$ , o conjunto de restrições de balanço de demanda (3.6) apresenta adaptações quando comparado às restrições (3.2) do MILP, com destaque para a necessidade de utilização dos coeficientes  $dem_{[j]}$  na sua matriz de incidência. O conjunto de restrições (3.7) é adicionado para garantir exclusividade na alocação de caminhos para escoamento das demandas.

Admitindo um cenário de pior caso, onde todas as demandas podem ser atendidas, cada uma por *k-caminhos* factíveis, através de *links* que apresentam todas as modularidades candidatas, o número de variáveis requeridas no modelo ILP é  $(|LINK| \times |OLINK| + |DEM| \times k)$ , onde  $X_{[i][n]}$  e  $Y_{[j][k]}$  são todas binárias. Já a quantidade de restrições mantém-se a mesma do MILP,  $(|DEM| + 2 \times |LINK|)$ .

### 3.4 Modelagem de Demanda Imprecisa

A demanda prevista para ser atendida é um parâmetro difícil de ser estimado com precisão. Ela pode ser influenciada por vários fatores tais como flutuação de preços de mercado, surgimento de novas tecnologias que atraem novos consumidores, entre outros. Uma vez que a variação deste

fator afeta o dimensionamento da rede, ele se torna um ponto crucial no processo de decisão. No caso dos modelos propostos neste trabalho, estes parâmetros influenciam diretamente na modelagem da função objetivo e de algumas restrições. Diante desta situação, optou-se por modelar estes parâmetros utilizando uma modelagem de dados com números *fuzzy*. A proposta é criar modelos mais flexíveis e realistas, que permitam uma análise computacional que passe a abranger cenários nos quais o planejador não tenha a obrigatoriedade de indicar valores precisos para os dados de demanda.

### 3.4.1 Processo de Defuzzyficação

A modelagem das demandas imprecisas ( $\tilde{d}_k$ ) é realizada através de números *fuzzy* trapezoidais [99] [100],  $(d_{ka}, d_{kb}, d_{kc}, d_{kd})$ , apresentada na Figura 3.2. Essa modelagem pode ser utilizada tanto para o MILP quanto para ILP, uma vez que a demanda modelada em ambos os modelos é a mesma.

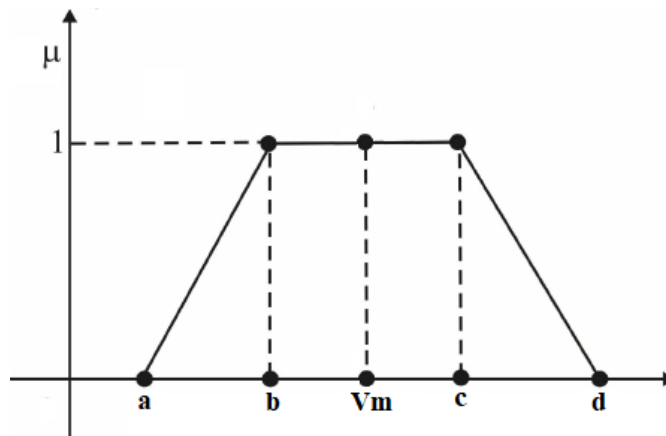


Figura 3.2: Modelagem *fuzzy* da demanda

O valor médio ( $V_m$ ) representa o valor de maior pertinência, ou seja, de maior possibilidade de ocorrência. Os modelos ILP e MILP com demandas *fuzzy* no conjunto de restrições (3.2) e (3.6), respectivamente, necessitam ser ajustados para poderem ser resolvidos, uma vez que agora tem-se informações imprecisas especificadas nos seus termos independentes (lado direito das restrições).

Para utilizar os números *fuzzy* nas simulações computacionais é necessário transformá-los em números *crisp*. Existem várias técnicas para a defuzzyficação [70]. Contudo, neste trabalho, para os dados de demanda, optou-se por substituir o número *fuzzy* por um valor que permita resolver o problema de forma mais simples sem perder as características de imprecisão do número *fuzzy*.

A técnica de resolução escolhida para os modelos MILP-*Fuzzy* e ILP-*Fuzzy* baseia-se nos trabalhos de [74] [75], que utilizam a técnica para resolver outros tipos de problemas, como por exemplo os de transportes. Em particular, no modelo MILP-*Fuzzy*, o conjunto de restrições (3.2) passa a ser modelado (substituído) pelos conjuntos de restrições (3.10) e (3.11). O modelo MILP-*Fuzzy* pode ser descrito conforme o Modelo C3-3.

Modelo C3-3

$$\text{Min} \sum_{[i] \in LINK} \sum_{[n] \in O_{LINK}} C_{[i][n]} X_{[i][n]} \quad (3.9)$$

$$\sum_{[k] \in P_j} Y_{[j][k]} \leq \frac{\alpha}{2} \cdot \frac{d_{ka} + d_{kb}}{2} + \left(1 - \frac{\alpha}{2}\right) \cdot \frac{d_{kc} + d_{kd}}{2} \quad \forall k \in DEM \quad (3.10)$$

$$\sum_{[k] \in P_j} Y_{[j][k]} \geq \frac{\alpha}{2} \cdot \frac{d_{kc} + d_{kd}}{2} + \left(1 - \frac{\alpha}{2}\right) \cdot \frac{d_{ka} + d_{kb}}{2} \quad \forall k \in DEM \quad (3.11)$$

$$\sum_{[n] \in O_{LINK}} Cap_{[n]} X_{[i][n]} - \sum_{[k] \in \Omega_i} Y_{[j][k]} \geq 0, \quad \forall [i] \in LINK \quad (3.12)$$

$$\sum_{[n] \in O_{LINK}} X_{[i][n]} \leq 1, \quad \forall [i] \in LINK \quad (3.13)$$

O método de defuzzificação no Modelo C3-3 consiste em obter um número *crisp* a partir de uma função de parametrização, na qual um fator de confiança,  $\alpha \in [0,1]$ , expressa o quão preciso são os dados de demanda. A variação do fator de confiança permite analisar diferentes cenários, ou seja, diferentes possibilidades de demanda prevista. Deve ser observado que o fator  $\alpha = 0$  representa o maior intervalo no número *fuzzy*, isto é, menor confiança.

À medida que o fator de confiança,  $\alpha$ , aproxima-se de 1, o intervalo de demanda previsto diminui. Com  $\alpha = 1$ , o termo independente dos conjuntos de restrições (3.10) e (3.11) alcançam o mesmo valor  $V_m$  (Figura 3.3), tornando-se assim, igual o Modelo C3-1.

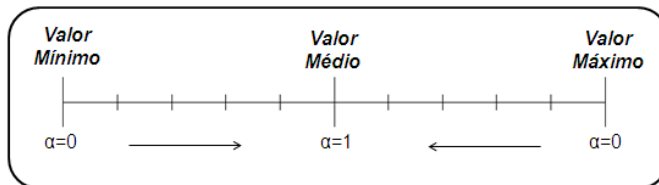


Figura 3.3: Variação dos limites de demanda

A teoria e as técnicas computacionais para análise paramétrica de problemas ILP/MILP ainda não estão totalmente fundamentadas, e muito menos disponíveis comercialmente. Assim, encontrar soluções para os problemas apresentados não é uma tarefa simples. A complexidade computacional aumenta se as instâncias possuem um grande número de variáveis binárias. Isto porque a solução completa exige a obtenção do objetivo ótimo para todos os valores de  $\alpha$ .

Aplicações da modelagem MILP-*Fuzzy* para valores discretos do parâmetro  $\alpha$  estão descritas no Capítulo 6. Estes cenários procuram dimensionar a rede conforme o grau de confiança que o planejador possui em relação aos dados de demanda prevista para ser atendida, de acordo com a matriz de interesse de tráfego entre os nós.

### 3.5 Algoritmo Genético para Resolver o ILP

Algoritmo genético é um método computacional de busca baseado em mecanismos de evolução natural e da genética. Tal algoritmo vem sendo utilizado para a resolução dos mais variados e complexos tipos de problemas devido a sua estrutura genérica [89]. Aplicações em planejamento de rede de telecomunicações podem ser encontradas em [25] [27] [28] [36] [84] [86].

No problema considerado neste trabalho, a solução precisa incluir as rotas escolhidas para escoar cada demanda, os sistemas de transmissão alocados em cada *link* e o custo total da rede, composto por duas parcelas: custo de equipamentos e custo de rede óptica. A solução candidata é codificada em um genoma, compreendido por cromossomos. Cada cromossomo representa a demanda a ser atendida, bem como a codificação dos caminhos possíveis de serem utilizados para escoar a demanda. O custo da rede não está diretamente codificado, já que ele é avaliado pela função de aptidão (*fitness*) modelada na Equação (3.5), do modelo C3-2.

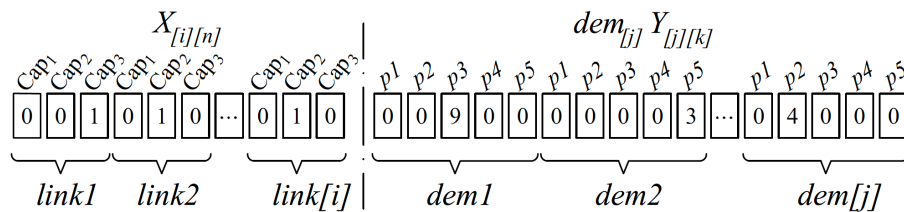


Figura 3.4: Codificação do cromossomo e estrutura do genoma

A Figura 3.4 mostra um exemplo de codificação da solução, onde cada demanda pode escolher um caminho de escoamento de um conjunto de caminhos pré-calculados. Vale observar que as variáveis binárias,  $X$ , modelam a possibilidade de alocar (ou não) um sistema de transmissão

de modularidade  $[n]$  ( $n=3$  na Figura 3.4) e as variáveis  $Y$  representam o fluxo de demanda escoado pelo caminho  $P_k$  ( $k=5$ , na Figura 3.4).

O fluxograma do modelo C3-4 desenvolvido está apresentado na Figura 3.5. Ela mostra as principais rotinas do GA: inicialização da população, *ranking* de soluções, operadores de *crossover* e de mutação, e avaliação da função de aptidão.

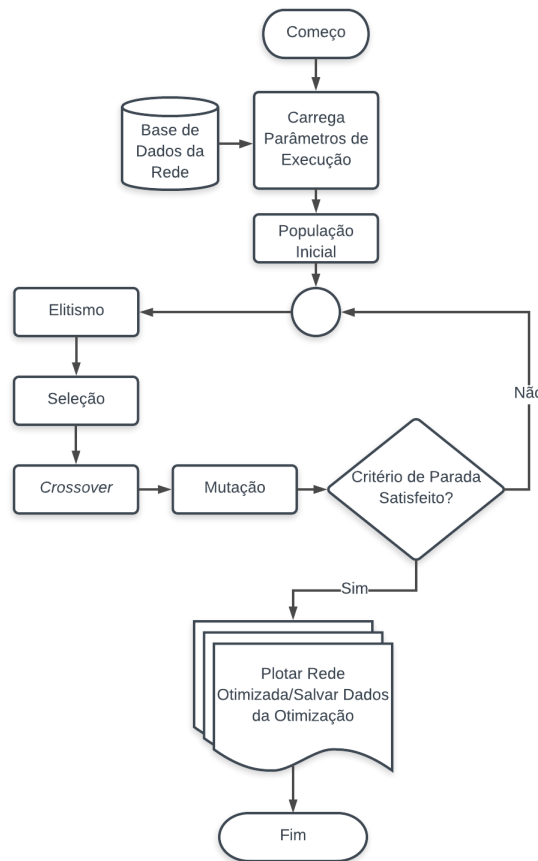


Figura 3.5: Fluxograma do Modelo C3-4 GA

O pseudocódigo apresentado no Algoritmo GA apresenta os seus passos básicos.

---

### Algoritmo GA – Pseudocódigo

---

Passo01. Inicializa os parâmetros do algoritmo

Número da população ( $nPop$ )

Número de gerações ( $nGer$ )

Probabilidade de *crossover* ( $Pc$ )

Probabilidade de mutação ( $Pm$ )

Passo02. Função objetivo  $f(x)$ ,  $x = (x_1, \dots, x_d)^T$

Passo03. Gera população inicial  $P$  de cromossomos  $x_i (i = 1, 2, \dots, n)$

Passo04. A função fitness é determinada por  $f(x_i)$

Passo05. Enquanto ( $t < nGer$ )

Executa a seleção do torneio

Aplicar mecanismo de *crossover* com probabilidade  $Pc$

Aplicar mecanismo de mutação com probabilidade  $Pm$

Passo06. Ranquear os indivíduos e encontre a melhor solução global

Passo07. Fim do Enquanto

---

A seguir é apresentada uma descrição mais detalhada de cada uma dessas rotinas.

### População inicial

A quantidade de indivíduos que farão parte da população inicial é de definição do usuário. O tamanho dessa população é mantido durante todo o processo iterativo, sendo que cada indivíduo da população é criado em duas etapas:

- *Etapa das variáveis Y*: Consiste em alocar aleatoriamente os valores de demandas a serem escoados em algum dos caminhos disponíveis. Assim é possível verificar o fluxo total sendo escoado através de cada *link*.
- *Etapa das variáveis X*: Com os fluxos de cada *link* calculados na etapa anterior, aloca-se para cada arco uma modularidade (variável  $X$  assume valor 1) igual ou superior ao fluxo total. Para aqueles casos em que o fluxo no *link* é identificado como nulo, a variável  $X$  é configurada com valor 0.

As etapas descritas permitem a completa definição de cada solução factível, de forma que o processo deve se repetir para cada indivíduo da população.

### Ranking de Soluções (Seleção)

A população inicial representa um conjunto de propostas de soluções factíveis para o problema apresentado. Então é necessário que cada elemento desse conjunto seja avaliado quantitativamente para que se possa definir a qualidade de cada solução. Para o GA desenvolvido, a própria função objetivo do ILP é utilizada como função de aptidão. Dessa forma as soluções têm sua qualidade avaliada de acordo com o custo apresentado. Sendo que, quanto menor o custo melhor o indivíduo.

Agora, para o processo de *crossover* é necessário que se faça uma seleção dos indivíduos a serem cruzados. A seleção por torneio é realizada através do sorteio de dois conjuntos de soluções retirados da população corrente. Em cada conjunto realiza-se um torneio onde apenas o melhor é selecionado. Com o melhor indivíduo de cada conjunto selecionado, tem-se um par de indivíduos

para o *crossover*. Esse processo de seleção é realizado para cada *crossover* que ocorrerá em uma geração do algoritmo.

A quantidade de indivíduos sorteados da população inicial também é definida pelo planejador. Porém, quanto maior o conjunto maior também a pressão de seleção, pois as chances de que os mesmos indivíduos sejam selecionados aumentam, e esse fato diminui a diversidade da população.

### ***Crossover***

Com os pares de indivíduos definidos no operador de seleção, os indivíduos precisam realizar uma troca de informações para que possíveis melhores soluções sejam encontradas no decorrer das gerações. O operador de *crossover* não garante que uma melhor solução será encontrada, porém com os indivíduos devidamente selecionados, isso pode acontecer com frequência.

O cruzamento implementado, assim como a população inicial, acontece em duas etapas, sendo que a etapa das variáveis  $X$  não se altera. Assim, é definido aleatoriamente um ponto de corte na cadeia de variáveis  $Y$ , com a restrição de que caminhos de uma mesma demanda não podem ser separados por este ponto de corte. Isso acontece pois futuramente esse processo pode representar a duplicação de uma demanda dentro da rede o que modificaria todo o modelo, e tornaria o indivíduo inevitavelmente ineficaz. Assim as possibilidades de pontos de corte limitam-se ao número de demandas a serem escoadas na rede, respeitando a quantidade de caminhos candidatados para cada demanda.

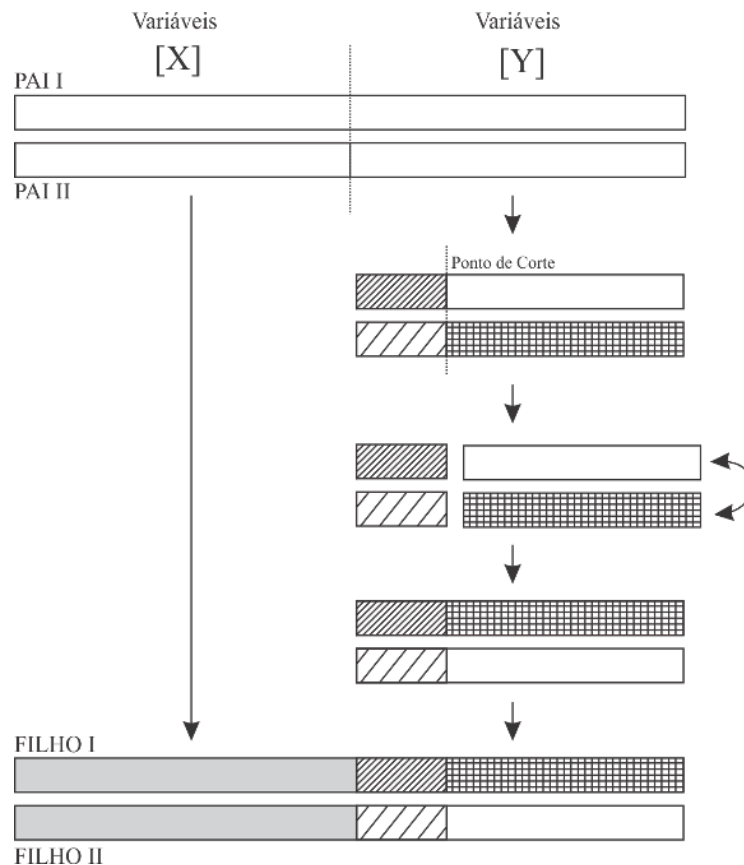
O ponto de corte é responsável por dividir a parcela  $Y$  do indivíduo em duas partes. A parte direita do primeiro indivíduo é concatenada com a parte direita do segundo, e vice-versa. Dessa forma gera-se dois *Filhos*, ou seja, duas novas soluções possíveis da rede, e que tendem a ser melhores que as duas anteriores. A Figura 3.6 descreve este procedimento de *crossover* do GA desenvolvido neste trabalho.

Após o procedimento de *crossover* executado na parcela  $Y$  da solução, de acordo com a Figura 3.6, cada filho gerado tem sua parcela  $X$  criada, permitindo a sua avaliação.

Apenas um filho poderá permanecer na próxima geração. A escolha do indivíduo segue a seguinte prioridade:

- 1ª – *duas soluções factíveis*: o indivíduo *Filho* de menor custo irá compor a próxima geração.

- 2ª – *apenas uma solução factível*: o indivíduo *Filho* factível é selecionado.
- 3ª – *nenhuma solução factível*: o operador de *crossover* é realizado novamente com outros pontos de corte até encontrar uma solução factível, ou seja, um indivíduo “filho” factível.

Figura 3.6: *Crossover*

Vale lembrar que o operador de cruzamento descrito acima é controlado por uma probabilidade de ocorrência definida pelo planejador. O operador de *crossover* só acontece caso a probabilidade seja atendida. Portanto, para o caso de não ocorrer *crossover*, o indivíduo *Pai* é simplesmente mantido na próxima geração.

### Mutação

O novo módulo de população (composto pelos novos indivíduos gerados no processo de *crossover*) pode sofrer leves alterações aleatórias nos caminhos escolhidos para escoar cada demanda. Este procedimento é realizado para garantir a diversidade da população no decorrer das gerações, diminuindo a probabilidade de convergência para um mínimo local.

A mutação não acontece em todos os indivíduos. Uma probabilidade de ocorrência também é definida para realizar o controle desse operador. Sendo que uma taxa de probabilidade muito alta pode representar uma desconstrução da solução no decorrer das gerações.

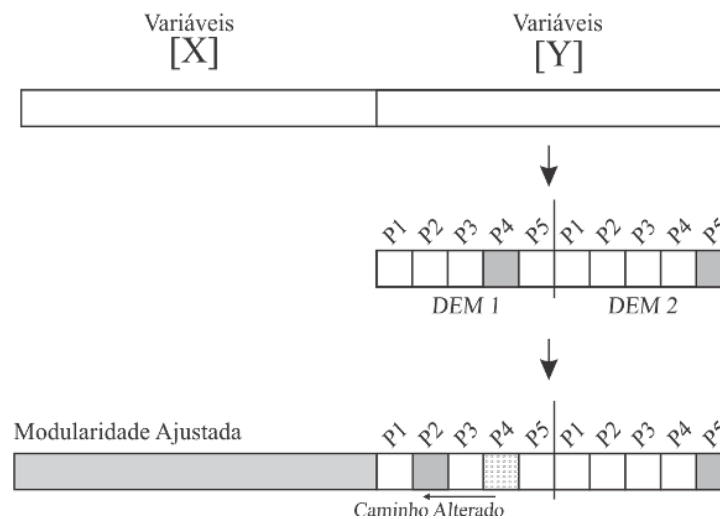


Figura 3.7: Processo de mutação

A mutação acontece também na parcela das variáveis  $Y$ . Conseqüentemente, a parcela  $X$  necessita ser definida novamente, conforme realizado na etapa 2 de criação da população inicial. A Figura 3.7 mostra um exemplo deste procedimento de mutação, em que a demanda  $DEM_1$  teve seu caminho alterado de  $P_4$  para  $P_2$ .

### 3.6 Algoritmo *Firefly* para Resolver o ILP

O algoritmo *firefly* é um dos conhecidos algoritmos baseados em enxame (*swarm*), possuindo diferentes tipos de aplicações. No planejamento de rede em sistemas de telecomunicações, aplicações podem ser encontradas em [34] [35] [39].

O fluxograma do modelo C3-5 desenvolvido está apresentado na Figura 3.8. Ela apresenta as principais rotinas do FA: inicialização da população de vaga-lumes, avaliação da função de objetivo (cálculo da intensidade luminosa), *ranking* e movimento dos vaga-lumes.

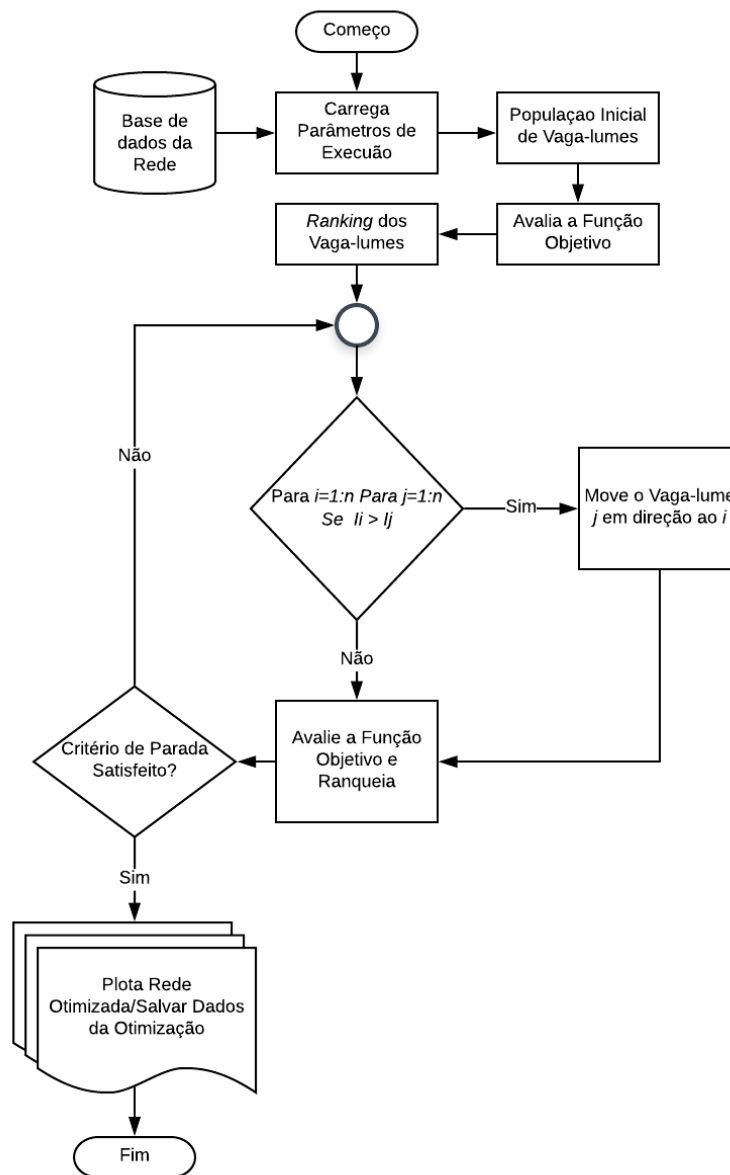


Figura 3.8: Fluxograma do Modelo C3-5 FA

As rotinas de codificação, geração da população inicial e de *ranking* segue o detalhamento descrito na Seção 3.5. O pseudocódigo apresentado no Algoritmo FA apresenta os passos do FA.

---

### Algoritmo FA – Pseudocódigo

---

Passo01. Inicializa parâmetros do algoritmo

Define o número de vaga-lumes ( $n$ )

Define o número de Geração ( $nGer$ )

Define coeficiente de absorção de luz ( $\gamma$ )

Define a atratividade ( $\beta_0$ )

- Define o valor de alfa ( $\alpha$ )
- Passo02. Defina Função Objetivo  $f(x), x = (x_1, \dots, x_d)^T$
- Passo03. Gera a população inicial  $P$  de vaga-lumes  $x_i (i = 1, 2, \dots, n)$
- Passo04. A intensidade da luz  $I_i$  em  $x_i$  é determinado por  $f(x_i)$
- Passo05. Enquanto ( $t < nGer$ ) faça
- Para cada  $x_i \in P$  faça
- Para cada  $x_j \in P$  faça
- Se ( $I_i < I_j$ ) então mova  $x_i$  para  $x_j$  fim se
- Varie  $\beta$  com a distância  $r$  via  $\exp[-\gamma r]$
- Avalie soluções e atualize a intensidade da luz
- Fim para  $j$
- Fim para  $i$
- Passo06. Ranquear os vaga-lumes e encontrar a melhor solução global
- Passo07. Fim do Enquanto

A seguir é apresentada uma descrição sobre a rotina do movimento dos vaga-lumes.

### Movimento do *firefly*

Após a criação da população de vaga-lumes (*fireflies*), é calculado para cada um o valor da intensidade luminosa (custo), que é obtida através da função objetivo do ILP. Com isso é possível avaliar a qualidade das soluções (*ranking*) de acordo com o custo apresentado. Sendo que, quanto menor o custo melhor o indivíduo (maior intensidade luminosa).

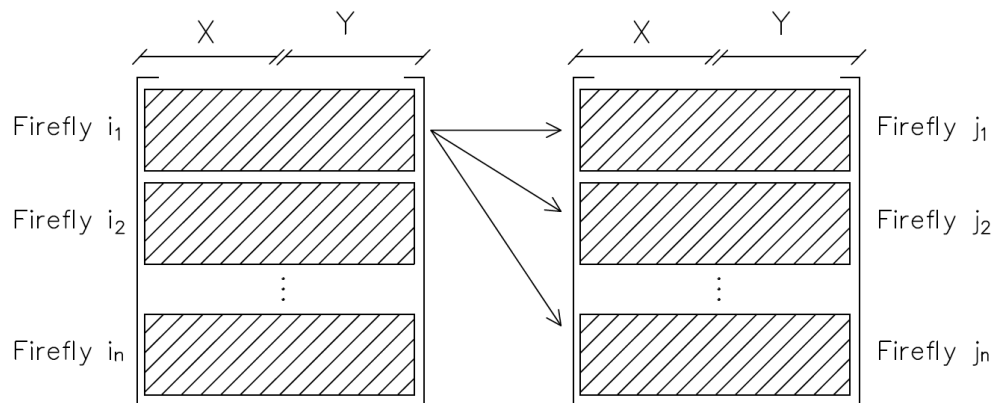


Figura 3.9: Movimento do *firefly*

Deste conjunto de soluções (matriz) contendo os vaga-lumes de menor custo para o de maior custo é criada outra matriz sendo que os vaga-lumes são posicionados do maior para o menor custo (realizado para obter maior diversidade), para entrar a etapa de movimento. O primeiro *firefly*  $i_1$  é comparado com todos os *fireflies*  $j$  (totalmente atraído), conforme apresentado na Figura 3.9.

Esse procedimento é realizado com o *firefly*  $i_2$  até *firefly*  $i_n$ . Caso o *firefly*  $j$  selecionado tenha menor intensidade, ou seja, maior custo de implantação, ele é movido em direção ao *firefly*  $i$ , que tem maior intensidade e este *firefly* é colocado na matriz  $i$ .

Para realizar o movimento primeiramente há a necessidade de se calcular a distância entre os *fireflies*. Para este cálculo é utilizada a distância de Hamming. O movimento é aplicado nas variáveis ( $Y$ ) dos *fireflies*. Um exemplo com sistema de transmissão de modularidade ( $n=3$ ) e com o fluxo de demanda escoado pelo caminho  $P_k$  ( $k=5$ ) é apresentado na Figura 3.10.

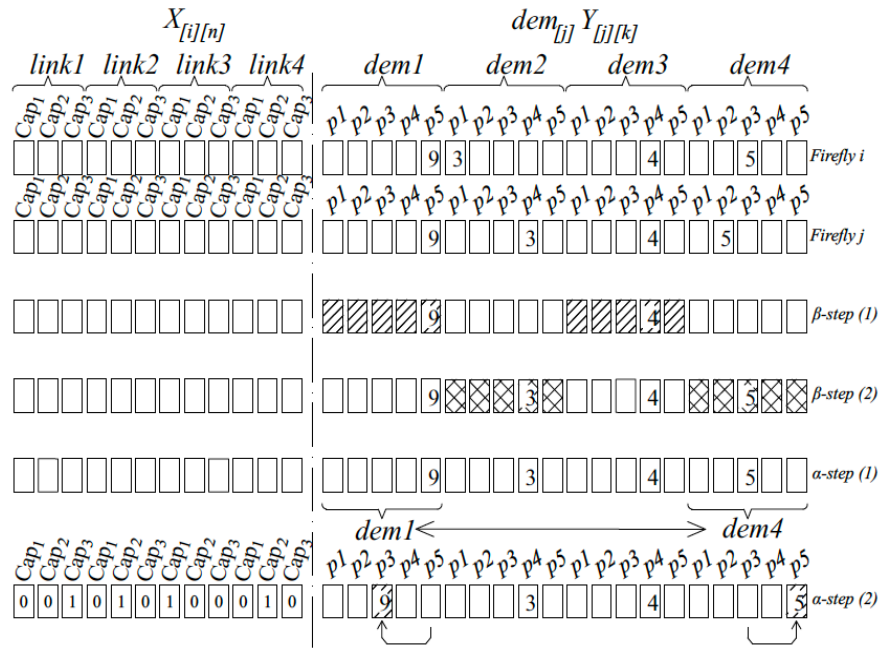


Figura 3.10: Movimento do *firefly*

No exemplo a distância de Hamming entre o *firefly*  $i$  e o *firefly*  $j$  é 2 (demandas escoadas por caminhos diferentes em  $dem2$  e  $dem4$ ). Para realizar o movimento é feito o  $\beta$ -step, ou seja, cria-se um novo *firefly*,  $\beta$ -step (1), mantendo as demandas com os caminhos idênticos ( $dem1$  e  $dem3$ ). Após são preenchidas as lacunas, calcula-se a probabilidade  $\beta$  para cada lacuna e compara este valor com número aleatório  $rand()$  gerado no intervalo de  $[0,1]$ . Vale ressaltar que  $\beta$  é controlada pelo coeficiente de absorção de luz ( $\gamma$ ) definido pelo usuário e a distância de Hamming. Caso o  $rand() \leq \beta$  então a inserção é realizada com o elemento de do *firefly*  $i$ , caso contrário, do *firefly*  $j$ . No  $\beta$ -step (2) pode-se verificar que  $DEM_2$  foi selecionado do *firefly*  $j$ , já para  $dem4$  foi escolhido o do *firefly*  $i$ .

Com isso é realizado o  $\alpha$ -step. A quantidade máxima de permutações ( $\alpha$ -step) é controlada pelo parâmetro  $\alpha$ , definido inicialmente. Assim a quantidade de permutações é escolhida

aleatoriamente através de um *randi* gerado no intervalo de  $[1, \alpha]$  e após são escolhidas as demandas para realizar a permutação, também de forma aleatória. No exemplo, o valor de  $\alpha$  foi de 2. No  $\alpha$ -step (1) da Figura 3.9 pode ser observado que a quantidade de permutações foi igual a 1 e as demandas escolhidas para a troca foram as *dem1* e *dem4*. O que é alterado é o caminho da demanda a ser escoada e não os valores das demandas, sendo assim, a *dem1* que estava escoando sua demanda de 9 pelo caminho  $P_5$ , passa a ser escoado pelo  $P_3$ , que era o caminho que escoava a demanda de 5 da *dem4*. E na *dem4* a troca foi realizada de  $P_3$  para  $P_5$ .

Com isso pode-se calcular o fluxo de cada *link* e assim alocada a modularidade (etapa das variáveis  $X$ ), caso o *firefly* seja inactivo, o processo de movimentação é realizado novamente, até a criação de um *firefly* activo. Após o término da comparação/movimento de todos os *fireflies* é realizado um novo *ranking*. Caso o critério de parada (número de gerações) seja alcançado é plotada a melhor solução (*firefly* com menor custo). Se o critério de parada não é alcançado volta novamente para a rotina de movimento dos *fireflies*.

### 3.7 Algoritmo HFA para Resolver o ILP

A metaheurística híbrida tem como objetivo transformar a solução atual em uma ou mais soluções aprimoradas. As metaheurísticas híbridas utilizando o algoritmo *firefly* vem sendo utilizadas para a resolução dos mais variados e complexos tipos de problemas, como por exemplo, CFLP [39], caixeiro viajante (TSP) [40], problemas numéricos [101], funções de *Benchmark* [102] [103], roteamento de veículos [104], etc. Para realizar a melhoria das soluções é utilizado neste estudo o método híbrido proposto em [39]. A categoria desta metaheurística híbrida é a integrativa [105], sendo que um algoritmo é considerado um componente subordinado e incorporado a de uma metaheurística mestre, que rege o processo de busca.

Neste estudo a metaheurística mestre é o algoritmo *firefly* e o algoritmo genético é subordinado a ele (HFA – *Hybrid Firefly-Genetic Algorithm*). O fluxograma do modelo C3-6 desenvolvido está apresentado na Figura 3.11. O algoritmo *firefly* é estendido com o mecanismo de *crossover* e mutação, que é o método de melhoria apresentado no pseudocódigo do Algoritmo HFA (Passo06).

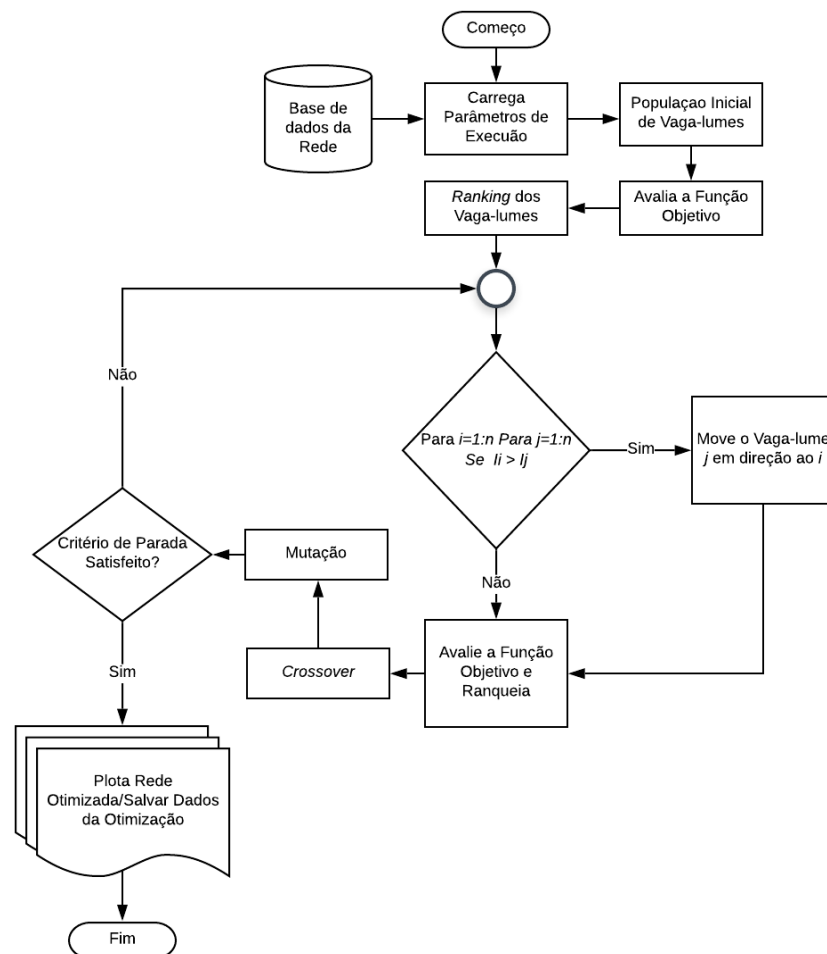


Figura 3.11: Fluxograma do Modelo C3-6

Duas soluções são utilizadas a cada iteração, sendo a primeira a segunda solução do *ranking* (maior intensidade de luz) realizado pelo algoritmo *firefly*. Os vaga-lumes selecionados passarão pelos operadores de *crossover* e mutação do algoritmo genético, ou seja, as probabilidades de cruzamento e mutação são 100%. Os dois melhores vaga-lumes possíveis entre pais e filhos são mantidos na primeira e na segunda posição da população e o restante é eliminado.

---

### Algoritmo HFA – Pseudocódigo

---

Passo01. Inicializa parâmetros do algoritmo

Define o número de vaga-lumes ( $n$ )

Define o número de Geração ( $nGer$ )

Define coeficiente de absorção de luz ( $\gamma$ )

Define a atratividade ( $\beta_0$ )

Define o valor de alfa ( $\alpha$ )

- Passo02. Defina Função Objetivo  $f(x), x = (x_1, \dots, x_d)^T$
- Passo03. Gera a população inicial  $P$  de vaga-lumes  $x_i (i = 1, 2, \dots, n)$
- Passo04. A intensidade da luz  $I_i$  em  $x_i$  é determinado por  $f(x_i)$
- Passo05. Enquanto ( $t < nGer$ ) faça
- Para cada  $x_i \in P$  faça
    - Para cada  $x_j \in P$  faça
      - Se ( $I_i < I_j$ ) então mova  $x_i$  para  $x_j$  fim se
      - Varie  $\beta$  com a distância  $r$  via  $\exp[-\gamma r]$
      - Avalie soluções e atualize a intensidade da luz
    - Fim para  $j$
  - Fim para  $i$
- Passo06. Aplica o método de melhoria
- Ranquear os vaga-lumes e encontrar a melhor solução global
  - Aplicar mecanismo de *crossover* nas duas melhores soluções correntes
  - Aplicar mecanismo de mutação
- Passo07. Fim do Enquanto
- 

### 3.8 Comentários Finais

Neste capítulo foram discutidos os modelos ILP e MILP. O modelo geral do MILP (Modelo C3-1) foi apresentado na Seção 3.2, já o ILP (Modelo C3-2) foi apresentado na Seção 3.3, destacando-se a função objetivo bem como suas restrições. Os modelos gerais anteriormente desenvolvidos para o planejamento da rede foram seguidamente modificados, de acordo com a estratégia usada para representar a demanda imprecisa. Para incorporar imprecisão a respeito dos dados de demanda nos modelos de planejamento de sistemas de telecomunicações, apresentou-se na Seção 3.3 o Modelo C3-3 MILP-*Fuzzy*. Visando tornar o modelo de planejamento da rede flexível e realista, além da introdução da lógica *fuzzy* foram realizadas adaptações e assim, desenvolvendo os modelos ILP com o algoritmo genético (Modelo C3-4) apresentado na Seção 3.5, *firefly* (Modelo C3-5) descrito na Seção 3.6 e o algoritmo híbrido (Modelo C4-6) descrito na Seção 3.7. Os modelos aqui tratados são aplicados em redes de transporte ópticas, sendo que as modelagens específicas para essas redes são apresentadas nos Capítulos 4 e 5.

Vale lembrar que o Modelo C3-1 permite o dimensionamento da rede com escoamento de demanda contínua, onde cada demanda pode utilizar mais de um caminho candidato. Já os Modelos C3-2, C3-4, C3-5 e C3-6 resolvem o ILP proposto apenas para caminhos simples. Embora o

processo de comutação nos nós da rede não seja escopo deste trabalho, a rede dimensionada pelos modelos C3-2, C3-4, C3-5 e C3-6 oferecem uma matriz de comutação mais simples que o Modelo C3-1. Porém, esta característica fica comprometida pela oferta de soluções de redes mais caras.

---

## Capítulo 4. MODELOS PARA REDES DE TRANSPORTES ÓPTICAS PDH – IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL

---

Este capítulo apresenta os modelos para redes de transportes ópticas PDH com base nos conceitos discorridos no Capítulo 3. Os modelos aqui abordados são MILP e ILP utilizando a técnica de modelagem arco-caminho. Há a necessidade de adaptações (ajustes) nos modelos gerais (Modelo C3-1 e C3-2) para atender as especificidades da rede, da tecnologia, da matriz de demanda prevista e restrições de atendimento. As redes aqui tratadas são a PDH, devido permitir critérios de comparação e desempenho do modelo com outros trabalhos na literatura.

O objetivo das seções seguintes é apresentar de forma detalhada o processo de implementação computacional dos modelos e algoritmos propostos para avaliar redes PDH. Nas metodologias propostas, o processo de desenvolvimento de cada rotina está pautado na criação de funções no *software* MATLAB® (arquivos *.m*). A plataforma computacional mínima necessária para execução destas ferramentas exige: o *software* MATLAB® versão R2015b, acrescido da sua *Toolbox* de otimização. Embora as Seções a seguir descrevam os fluxogramas para cada etapa do processo, vale destacar, antecipadamente, as principais contribuições (adaptações e/ou ajustes) que foram sendo agregadas aos modelos de otimização:

- Modelo C4-1 e C4-4 (MILP): Para permitir a aplicabilidade da metodologia para redes de todos os portes, os modelos exatos necessitam de métodos de resolução fundamentados em metaheurísticas. Para permitir a utilização destas metaheurísticas, o modelo tem suas variáveis  $Y_{[i][j]}$  configuradas como reais. É importante destacar que a possibilidade de escoamento da demanda de um nó pode ser atendida por mais de um caminho e que cada demanda tem um nó de origem e um único destino, diferente do que é apresentado no Capítulo 7, onde tem múltiplos nós de destino.
- Modelos C4-2, C4-3, C4-5 e C4-6 (ILP): Esses modelos têm suas variáveis  $Y_{[i][j]}$  configuradas de reais para binárias. Outro ponto é a possibilidade de escoamento da demanda de um nó pode ser atendida por apenas de um caminho.
- Modelos C4-4, C4-5 e C4-6 (*Fuzzy*): Para permitir a aplicabilidade das metodologias para cenários de rede com demanda imprecisa, a modelagem de dados *fuzzy* é adicionada aos

modelos e algoritmos de otimização. Os ajustes acontecem principalmente nas restrições de fluxo de demanda, com destaque para o processo de defuzzyficação da matriz de interesse de tráfego. As soluções de rede para a tecnologia PDH passam a ser dependentes de um parâmetro que mede o grau de confiança do planejador nos dados de demanda previstos.

Estas contribuições revelam, de certa forma, a melhoria tanto na aplicabilidade dos modelos propostos quanto na qualidade dos resultados alcançados ao longo de todo o processo. Adicionalmente, o grau de complexidade dos modelos propostos também acompanhou esta evolução. Inevitavelmente, estuda-se a possibilidade de se disponibilizar as ferramentas computacionais criadas neste trabalho (Capítulo 4 e 5) de forma estruturada em uma *Toolbox* do MATLAB®. O objetivo é permitir que toda a metodologia de planejamento desenvolvida neste trabalho possa alcançar outros grupos de pesquisadores e engenheiros especializados no tema. Esta prática, conseqüentemente, possibilitará o desenvolvimento de um produto final com uma validação de aplicabilidade também comercial, além da acadêmica.

## 4.1 Implementação Computacional dos Modelos C4-1 ao C4-3 para a Rede PDH

A seguir são apresentadas as implementações computacionais para redes de transportes ópticas PDH. Para facilitar a compreensão cada implementação computacional recebeu uma determinada nomenclatura. Essas implementações têm como referência os conceitos apresentados no Capítulo 3. Para a implementação computacional do Modelo C4-1 é utilizado o Modelo C3-1 como referência e para os Modelos C4-2 e C4-3 é utilizado o Modelo C3-2.

### 4.1.1 Modelo C4-1 (MILP)

Para este modelo empregou o *solver intlinprog* do MATLAB®, que faz o uso do método de solução *branch-and-bound*. A primeira tarefa realizada foi importar todas as informações da rede para o ambiente de programação do MATLAB®. A função objetivo foi escrita separadamente em um arquivo *.m* que é utilizado nas avaliações feitas pelo *solver*. Uma vez que a *Toolbox* de otimização do MATLAB® utiliza o formato de modelagem matricial, as restrições foram criadas de acordo com esta orientação (posteriormente utilizada como referência para a implementação dos

modelos bio-inspirados). A Figura 4.1 ilustra a estrutura das matrizes que modelam as restrições deste Modelo C4-1.

O número de variáveis  $X_{[i][n]}$  e  $Y_{[j][k]}$ , representa a quantidade de colunas das matrizes  $A$  e  $A_{eq}$ . Na matriz  $A$  (restrições de desigualdade, do tipo menor ou igual) o conjunto de restrições de capacidade envolve todas as variáveis do problema, conforme conjunto de restrições (3.3). As restrições de exclusividade, dependem apenas das variáveis  $X_{[i][n]}$ , conforme conjunto de restrições (3.4). O número total de restrições da matriz  $A$  é igual a quantidade de linhas, que neste caso:  $2*LINK$  (conjunto de *links* do problema).

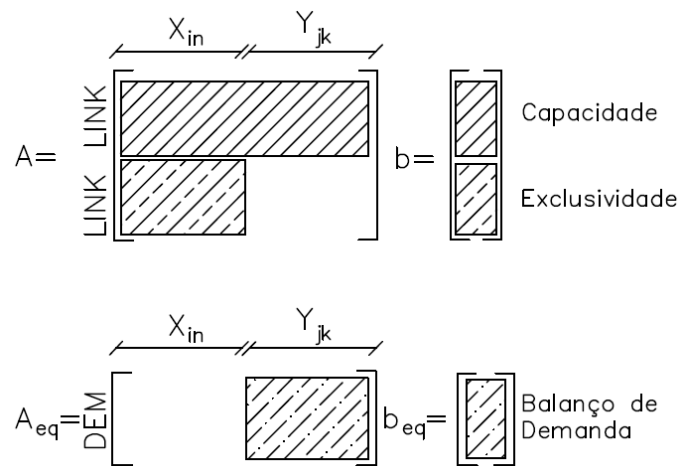


Figura 4.1: Matrizes de restrições modelo C4-1

Já na matriz  $A_{eq}$  (restrições de igualdade) estão contidas as restrições de balanço de demanda que dependem apenas das variáveis  $Y_{[j][k]}$ , conforme conjunto de restrições (3.2). O número de linhas da matriz  $A_{eq}$  é igual ao número de elementos do conjunto  $DEM$  (quantidade de demandas do problema). Os vetores  $b$  e  $b_{eq}$  contêm os valores dos dados referentes ao lado direito de cada restrição. O vetor  $b$  possui valores “0” para a parcela de *Capacidade* e valores 1 para a parcela de *Exclusividade*. O vetor  $b_{eq}$  é constituído pelas demandas previstas para serem atendidas.

Após a definição da função objetivo e das restrições, ainda é necessário especificar o tipo de cada variável, bem como determinar os seus limites superiores e inferiores. Isso é feito através de dois vetores de comprimento igual ao número de variáveis de decisão  $X_{[i][n]}$  e  $Y_{[j][k]}$ .

Aqui é importante reafirmar que caso necessite que o Modelo C3-1 ofereça soluções de rede que contemplem apenas caminhos simples para o escoamento das demandas são necessários os seguintes ajustes:

- As variáveis  $Y_{[j][k]}$  precisam ser definidas como tipo inteira binária (0 ou 1), assim como as variáveis  $X_{[i][n]}$ .
- Na primeira parte da matriz de incidência A (Figura 4.1) os coeficientes das variáveis  $Y_{[j][k]}$  devem ser trocados do valor 1 para o valor de demanda prevista.
- O vetor  $b_{eq}$  deve ter os todos os seus valores de demanda trocados pelo valor 1.

#### 4.1.2 Modelo C4-2 (ILP-GA)

Para a implementação computacional do Modelo C4-2 ILP-GA com o MATLAB® é utilizada como referência a Seção 3.5. O problema de otimização é definido a partir de funções e matrizes. A função objetivo é escrita separadamente em um arquivo *.m* que tem como parâmetro de entrada um vetor contendo todas as variáveis que contabilizam o objetivo.

Já as dimensões das matrizes são especificadas de acordo com o número de variáveis (quantidade de colunas) e a quantidade de restrições (número de linhas). São necessários ainda: uma especificação de matriz coluna constituída pelos os limitantes de cada restrição, dois vetores contendo dados de limites inferiores e superiores que estabelecem a amplitude mínima e máxima para os valores que cada variável de decisão pode assumir. A Figura 4.2 apresenta o fluxograma detalhado do Modelo C4-2 desenvolvido.

Ao iniciar a execução os parâmetros da rede PDH são carregados (*Configuração*), neste processo é contabilizado a quantidade de: *links*, demandas previstas em canais E1, modularidades em canais E1, caminhos para escoar cada demanda. Vale ressaltar que a geração do conjunto de caminhos pode ser realizada utilizando-se a forma manual, ou seja, contando com a experiência do planejador, ou de forma automática utilizando o *kcaminhos*.

Após há a necessidade da definição pelo usuário do número de indivíduos que terá a população inicial, a quantidade de gerações que o algoritmo será executado, número de torneios para a seleção dos indivíduos que vão passar pelo processo de *crossover* e número de mutações. São definidos também a probabilidade de *crossover* e mutação. As rotinas *Variáveis Básicas* e *Codificação* são executadas, que tem a função de fixar dentro de cada código as variáveis básicas dentro de cada função e de codificar o modelo matemático em forma de matrizes para que sejam utilizadas durante a execução do GA, respectivamente. Dentro da rotina *Variáveis Básicas* são geradas a quantidade de variáveis  $X$  (dado pelo número de *links* vezes número de modularidades) e a quantidade de variáveis  $Y$  (dado pelo número de demandas vezes número de caminhos).

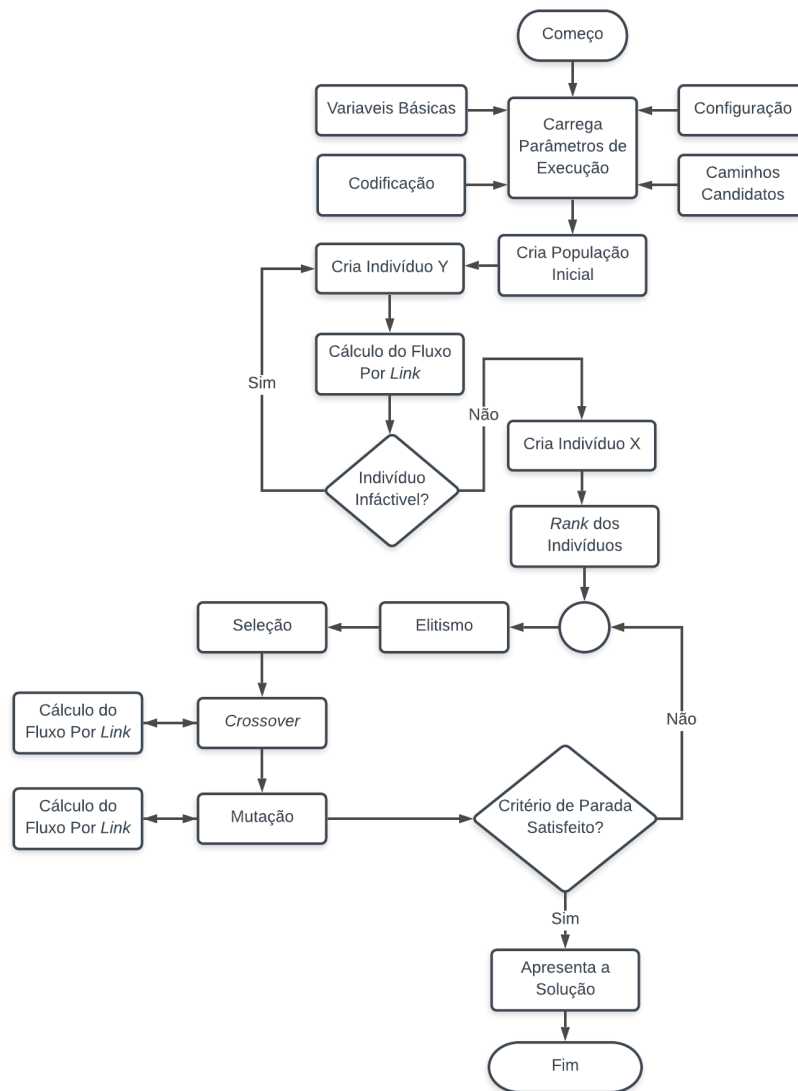


Figura 4.2: Fluxograma do modelo C4-2 para a rede PDH

Assim são criados os indivíduos da população inicial (*Cria População Inicial*), primeiramente é criada a parte *Y*, alocando-se aleatoriamente valores de demanda a serem escoadas pelos caminhos, após é chamada uma rotina para resolver a infactibilidade cuja a função é calcular o fluxo total em cada *link* e verificar se este fluxo é maior que as modularidades disponíveis, caso seja maior é criado outro indivíduo até que esta condição seja respeitada.

Com o fluxo definido é alocada a modularidade, (igual ou superior ao fluxo em canais E1) para cada *link*. Assim após criados todos indivíduos factíveis da população inicial são calculados os custos de cada um, com base na função *fitness*. Após se conhecer os custos de cada indivíduo a rotina *Elitismo* guarda o melhor indivíduo (menor custo) de cada geração. Com isso é realizada a

rotina de *Seleção* que irá realizar a seleção dos indivíduos a serem cruzados, para formar a nova população.

A seleção por torneio irá sortear aleatoriamente a quantidade escolhida pelo usuário, por exemplo 3, assim busca-se na população 3 indivíduos e escolhe o de menor custo para ser o  $Pai_1$ , após escolhe novamente mais 3 indivíduos e o de menor custo é o  $Pai_2$ . Assim a rotina *Crossover* é executada.

Ela tem a função de gerenciar a nova população a ser criada, onde é selecionado o ponto de corte aleatoriamente no  $Pai_1$  e  $Pai_2$ , assim os novos filhos são gerados permutando-se a parte inicial de um  $Pai$  com a parte final do outro. O *crossover* é realizado na parcela  $Y$ , após cada filho gerado tem sua parcela  $X$  criada, permitindo a sua avaliação. Assim é necessário calcular o fluxo total em cada *link* e verificar se as modularidades atendem esse fluxo. Apenas um filho pode permanecer para a próxima geração. Caso tenha dois filhos factíveis o de menor solução vai para a próxima geração, caso tenha apenas um, esse irá para a próxima geração e caso nenhum deles sejam factíveis o operador de *crossover* é realizado novamente. O operador de *crossover* só ocorre caso a probabilidade escolhida pelo usuário seja atendida.

Tem-se assim o novo módulo da população, e alguns indivíduos desta população sofrerão mutação, realizada pela rotina *Mutação*. Esse operador é controlado pelo parâmetro escolhido pelo usuário ao início. A mutação realiza alterações aleatórias nos caminhos escolhidos para escoar a demanda prevista em canais E1, como ela ocorre na parte  $Y$ , a parcela  $X$  deve ser criada novamente e realizado um teste (*Cálculo do Fluxo Por Link*) que verificar se este indivíduo que sofreu a mutação é factível. Com os novos indivíduos desta nova geração é realizado o elitismo e o processo se repete até chegar ao número de gerações configurada pelo usuário. Já com os dados da rede otimizada a rotina de apresentar o resultado irá plotar a rede solução e apresentar também um gráfico com a evolução da solução por geração.

### 4.1.3 Modelo C4-3 (ILP-FA)

Para a implementação computacional do Modelo C4-3 ILP-FA com o MATLAB® para a rede PDH utilizou o detalhamento da Seção 4.1.2 e 3.6, seguindo o fluxograma da Figura 4.3. As rotinas de codificação, geração da população inicial e de *ranking* segue o detalhamento descrito no modelo C4-2.

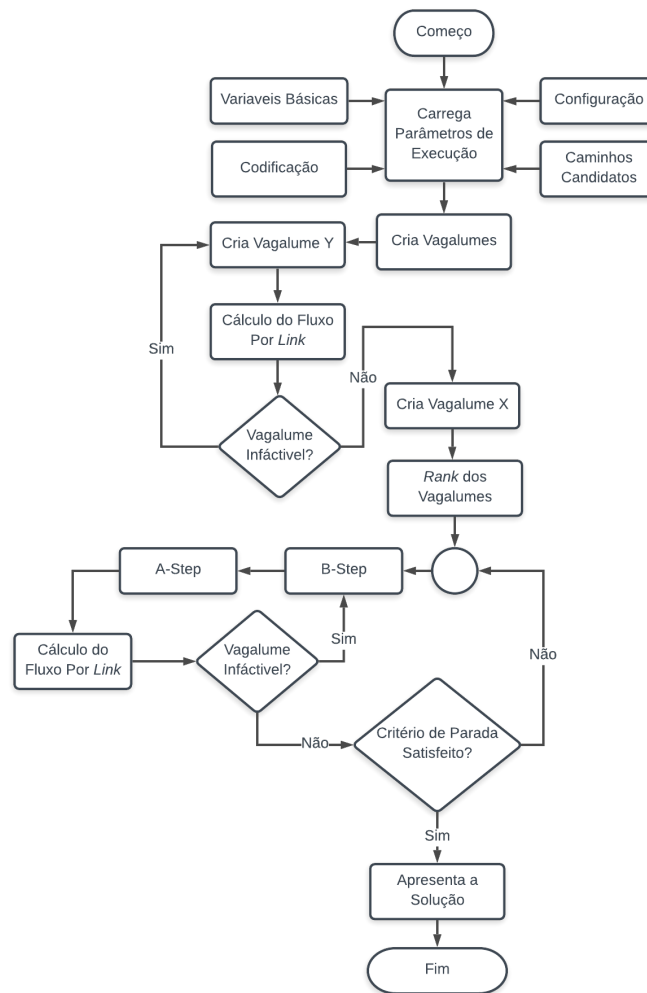


Figura 4.3: Fluxograma do modelo C4-3 para a rede PDH

Após carregar os parâmetros de execução, é criada a população inicial de vaga-lumes, em seguida é calculada a intensidade luminosa (através da função objetivo) e realizado o *ranking*.

Com isso é feito o movimento dos vaga-lumes (*B-Step* e *A-Step*), descrito na Seção 3.6. Após é calculado o fluxo total em cada *link* e verificado se este fluxo é maior que as modularidades disponíveis, caso seja maior (infactível), o processo de movimentação é realizado novamente, até a criação de um *firefly* factível.

## 4.2 Implementação Computacional dos Modelos C4-4 ao C4-6 para a Rede PDH

A seguir são apresentadas as implementações computacionais para redes de transportes ópticas PDH com a modelagem *fuzzy*. Essas implementações têm como referência os conceitos apresentados na Seção 3.4 do Capítulo 3.

### 4.2.1 Modelo C4-4 (MILP-Fuzzy)

Para a implementação computacional do Modelo C4-3 MILP-Fuzzy é utilizado o Modelo C3-3 como referência. Este modelo utiliza o *solver intlinprog* do MATLAB®. Este modelo contempla valores de demandas imprecisos (números *fuzzy* trapezoidais), conforme conjunto de restrições (3.10) e (3.11). A função objetivo foi escrita separadamente em um arquivo *.m* que é utilizado nas avaliações feitas pelo *solver intlinprog* (método de solução *branch-and-bound*). A Figura 4.4 apresenta a estrutura das matrizes que modelam as restrições deste Modelo C4-4.

Nota-se que neste caso a matriz  $A_{eq}$  e o vetor  $b_{eq}$  deixam de existir. Isto ocorre pelo fato de que este Modelo C4-4 não possui as restrições de igualdade referente ao balanço de demanda, que agora são tratadas conforme Equações (3.10) e (3.11). Assim para esta implementação tem-se a matriz  $A$  e o vetor  $b$ . A quantidade de colunas da matriz  $A$ , cuja restrições são de desigualdade do tipo menor ou igual, consiste no número de variáveis  $X_{[i][n]}$  e  $Y_{[j][k]}$ .

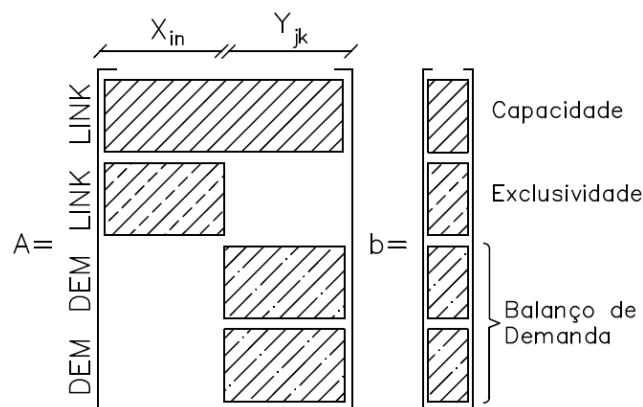


Figura 4.4: Matrizes de restrições modelo C4-4 para a rede PDH

O conjunto de restrições de capacidade envolve todas as variáveis ( $X_{[i][n]}$  e  $Y_{[j][k]}$ ) do problema, conforme (3.12). As restrições de exclusividade, dependem apenas das variáveis  $X_{[i][n]}$ , conforme conjunto de restrições (3.13). O número total de restrições da matriz  $A$  é igual a quantidade

de linhas, que neste caso:  $2 * LINK$  (conjunto de *links* do problema) mais  $2 * DEM$  (quantidade de demandas do problema). As demandas são duplicadas conforme o conjunto de restrições (3.10) e (3.11). Como tem-se uma restrição de maior ou igual (3.11) e a matriz  $A$  representa as restrições do tipo menor ou igual, deve-se multiplicar tal restrição por -1 para satisfazer essa condição.

O vetor  $b$  contém os valores dos dados referentes ao lado direito de cada restrição do Modelo C3-3. Sendo assim ele possui valores 0 para a parcela de *Capacidade*, valores 1 para a parcela de *Exclusividade* e as demandas previstas para serem atendidas para o conjunto de restrições de *Balanço de Demanda*.

#### 4.2.2 Modelo C4-5 (ILP-GA-Fuzzy)

Para a implementação computacional do Modelo C4-5 ILP-Fuzzy-GA com o MATLAB® para a rede PDH utilizou o detalhamento da Seção 4.1.2, seguindo o fluxograma da Figura 4.5.

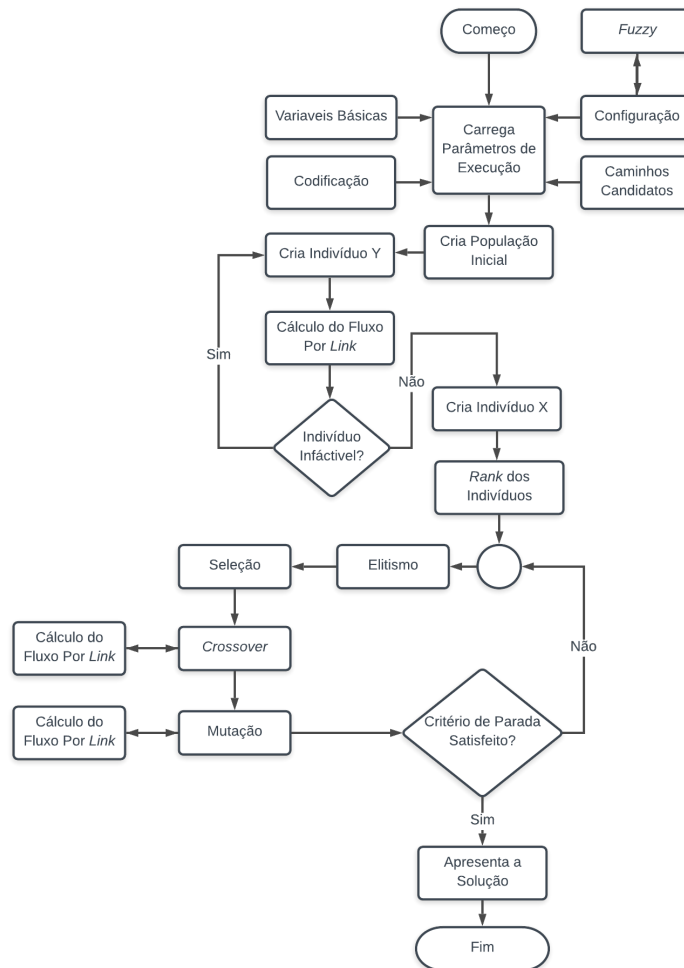


Figura 4.5: Fluxograma do modelo C4-5 para a rede PDH

O ajuste para a implementação deste modelo com a modelagem *fuzzy* da demanda, está na rotina *Configuração*, pois as demandas imprecisas são representadas pelos números *fuzzy* trapezoidais. Há a necessidade também de se definir o grau de confiança  $\alpha \in [0,1]$ , que expressa o quanto os dados de demanda são precisos. Com essas informações (das demandas imprecisas e valor de  $\alpha$ ) é possível definir o número *crisp* através da defuzzyficação, onde a rotina de *Configuração* irá chamar a *Fuzzy* para realizar esse processo.

#### 4.2.3 Modelo C4-6 (ILP-FA-*Fuzzy*)

Para a implementação computacional do Modelo C4-6 ILP-*Fuzzy*-FA com o MATLAB® para a rede PDH utilizou o detalhamento da Seção 4.1.3 e 4.2.2, seguindo o fluxograma da Figura 4.6.

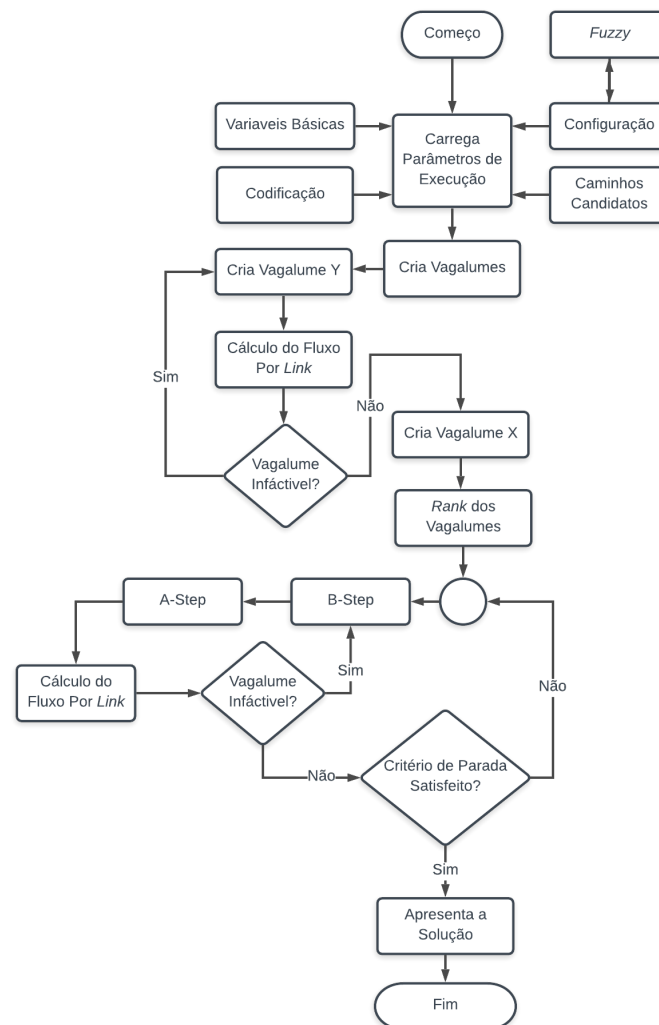


Figura 4.6: Fluxograma do modelo C4-6 para a rede PDH

### 4.3 Comentários Finais

Este Capítulo apresentou os modelos específicos para as tecnologias PDH de redes de transportes ópticas, trazendo os ajustes necessários nos modelos gerais do Capítulo 3 para contemplar esse tipo de tecnologia. A Seção 4.1 apresentou o detalhamento com destaque para as modularidades e a possibilidade de escoamento da demanda de um nó pode ser atendida por mais de um caminho no Modelo C4-1 e C4-4. Já os Modelos C4-2, C4-3, C4-5 e C4-6 permitem o escoamento por um único caminho. As aplicações dos modelos aqui descritos estão destacadas no Capítulo 6.

---

## Capítulo 5. MODELOS PARA REDES DE TRANSPORTES ÓPTICAS OTN/WDM – IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL

---

Este capítulo apresenta os modelos para redes de transportes ópticas OTN/WDM com base nos conceitos discutidos no Capítulo 3. Os modelos aqui apresentados são todos ILP utilizando a técnica de modelagem arco-caminho. Para estes há a necessidade de adaptações (ajustes) no modelo geral (Modelo C3-2) para atender as especificidades da rede, da tecnologia, da matriz de demanda prevista e restrições de atendimento. As redes aqui tratadas são a OTN/WDM, essa modelagem visa assegurar um cenário atual e realista em termos de parâmetros disponíveis para o planejamento.

O objetivo das seções seguintes é apresentar de forma detalhada o processo de implementação computacional dos modelos e algoritmos propostos para avaliar redes OTN/WDM. Nas metodologias propostas, o processo de desenvolvimento de cada rotina utilizou a criação de funções no *software* MATLAB® (arquivos *.m*). A plataforma computacional mínima necessária para execução destas ferramentas exige: o *software* MATLAB® versão R2015b, acrescido da sua *Toolbox* de otimização. As principais contribuições (adaptações e/ou ajustes) que foram sendo agregadas aos modelos de otimização:

- Modelo C5-1 ao C5-8 (ILP): Para permitir a utilização das metaheurísticas, o modelo MILP teve suas variáveis  $Y_{[i][j]}$  configuradas de reais para binárias. Nos modelos, os ajustes acontecem principalmente nas restrições de fluxo de demanda, com destaque para a matriz de incidência e o vetor de termos independentes. É importante destacar, também, que o perfil de tráfego modelado para a rede OTN/WDM é diferente daquele avaliado para a rede PDH (Capítulo 4). Em todos os modelos a demanda pode ser escoada por apenas um único caminho.
- Modelos C5-5, C5-6, C5-7 e C5-8 (*Fuzzy*): A modelagem de dados *fuzzy* é adicionada aos modelos e algoritmos de otimização para contemplar cenários de rede com demanda imprecisa. Os ajustes acontecem nas restrições de fluxo de demanda, com destaque para o processo de defuzzyficação. Assim como acontece para as redes PDH (Capítulo 4), as soluções de rede para a tecnologia OTN/WDM passam a ser dependentes de um parâmetro que mede o grau de confiança do planejador nos dados de demanda previstos.

Estuda-se a possibilidade das ferramentas computacionais aqui criadas para OTN, serem disponibilizadas em uma *Toolbox* do MATLAB®, juntamente com as desenvolvidas no Capítulo 4.

Com o intuito de trazer atualidade aos sistemas de apoio à decisão desenvolvidos, os modelos são adaptados para serem utilizados no dimensionamento da rede OTN/WDM. Nestas redes, os sistemas são especificados em termos de *Gigabit Ethernet* (GbE), com tecnologia para transmissão de quadros na rede com velocidades de *Gbps*. Mais ainda, a modelagem proposta aqui procura atender um cenário de matriz de tráfego bastante peculiar em termos de encaminhamento das demandas previstas para serem atendidas.

Conforme levantamento de campo junto a uma operadora de rede de transporte óptica de longa distância, as demandas previstas em cada nó de origem da rede possuem no máximo  $TN$  possíveis nós de destino (na rede PDH, cada demanda possui um nó de origem e um único nó de destino). Nestas circunstâncias, cada demanda prevista pode ser encaminhada de um único nó de origem para um único nó de destino (entre os  $TN$  destinos possíveis) ou ter a demanda no nó de origem particionada, com parcelas complementares encaminhadas para os  $TN$  possíveis nós de destino.

## 5.1 Implementação Computacional dos Modelos C5-1 ao C4-4 para a Rede OTN/WDM

Da mesma forma que foi feito para a rede PDH (Capítulo 4), agora são descritos os procedimentos necessários para a implementação computacional dos modelos de otimização propostos para o planejamento da rede OTN/WDM.

### 5.1.1 Modelo C5-1 (ILP)

Para a implementação computacional do Modelo C5-1 ILP é utilizado o Modelo C3-2 como referência. Para este modelo também é utilizado o *software* MATLAB®. A estrutura principal da ferramenta computacional foi desenvolvida para o Modelo C5-1 (ILP), que posteriormente foi utilizada para agregar a técnica de resolução com algoritmos genéticos, *firefly* e a modelagem dos dados imprecisos de demanda.

Essa implementação computacional segue o detalhamento descrito na Seção 4.1.1. Uma vez que para a rede de transporte óptica OTN/WDM estudada há uma particularidade, onde as

demandas geradas em qualquer nó da rede (nó de origem) necessitam de serem escoadas para os  $TN$  pontos de comunicação com a WAN (*Wide Area Network*) (nós de destino), são necessários alguns ajustes no que foi feito na Seção 4.1.1 para a rede PDH.

Alterações são necessárias na matriz  $A_{eq}$  (balanço de demanda), conforme apresentado na Figura 5.1, considerando a possibilidade de dois destinos para cada demanda prevista. Para cada demanda prevista o nó de destino tem  $TN$  possibilidades, assim há a duplicação das restrições de demanda, ou seja, para cada demanda ela pode ser escoada pelo destino 1 ou pelo destino 2, conforme demonstrado na Figura 5.1. Para que a restrição (3.6) não tenha a sua demanda prevista duplicada pelo procedimento descrito anteriormente, é necessário concatenar a parte da matriz  $A_{eq}$  do destino 2 levando-a para o destino 1, conforme apresentado na segunda parte na Figura 5.1. Assim, quando for realizado o somatório de escoamento de cada demanda, na Equação 3.6, garante-se a possibilidade de diversidade de nós de destino (dois no caso) sem duplicar o valor da demanda prevista.

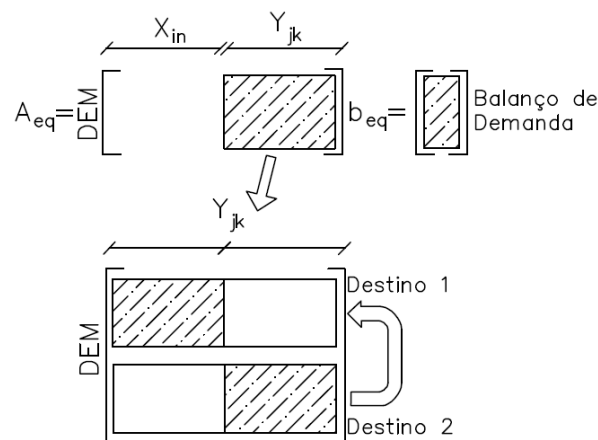


Figura 5.1: Matrizes de restrições de demanda do Modelo C5-1 para a rede OTN/WDM

Vale ressaltar que essas modificações só são necessárias pelo fato de existir, nessa rede específica em estudo,  $TN$  nós de destino para todas as demandas da rede. A implementação computacional dos conjuntos de restrições restante do Modelo C5-1 segue o que é feito no Modelo C4-1.

### 5.1.2 Modelo C5-2 (ILP-GA)

Para a implementação computacional do Modelo C5-2 ILP-GA com o MATLAB® desenvolvido para rede OTN/WDM, segue o descritivo apresentado na Seção 4.1.2. O modelo C5-

2 traz a técnica de algoritmo genético, e neste caso a solução permitida é apenas por atendimento de demanda por caminho único.

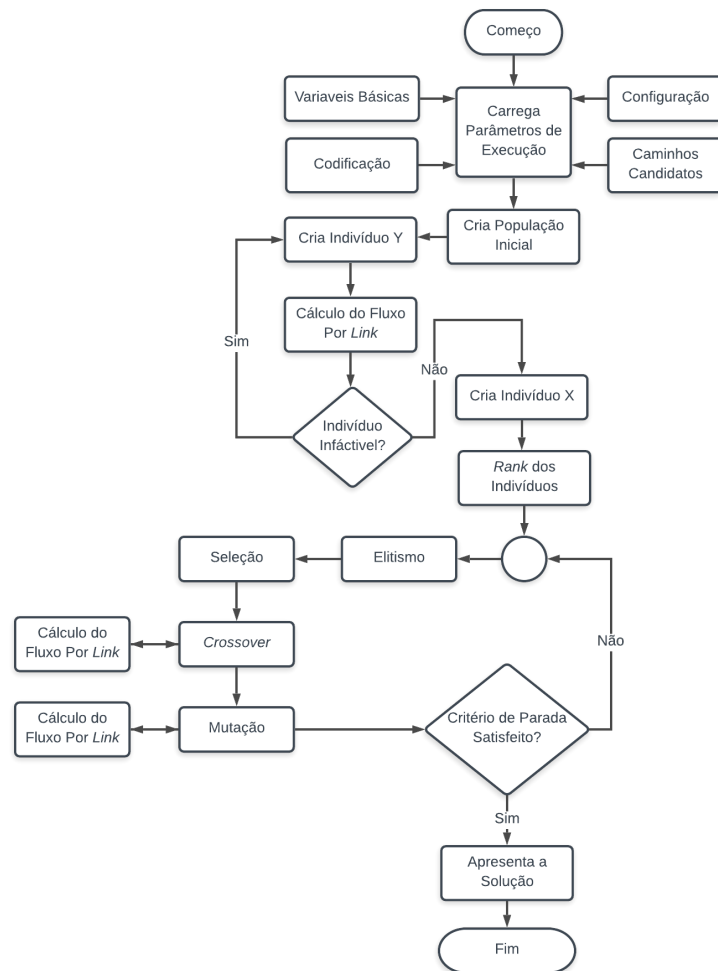


Figura 5.2: Fluxograma do modelo C5-2 para a rede OTN

O custo aqui é avaliado pela função de aptidão (*fitness*) modelada pela Equação (3.5), onde busca-se minimizar o custo de implantação da rede de transporte considerando os custos de implantação da rede óptica (em função do comprimento do *link*), de equipamentos de transmissão (conforme a modularidade adotada) e de regeneradores (caso necessário, dependendo do comprimento do enlace). Os trabalhos [24] [25] apresentam algoritmos heurísticos para resolver o problema de roteamento nas redes OTN/WDM. Nestes trabalhos o custo é pré-contabilizado na candidatura dos caminhos, já os modelos aqui tratados são contabilizados o custo da modularidade alocada no *link*.

O fluxograma do Modelo C5-2 desenvolvido para rede OTN/WDM segue o apresentado na Figura 5.2, com o descritivo da Seção 4.1.2. O ajuste para a implementação deste modelo com a particularidade descrita na Seção 4.1.2, está na etapa de *crossover*, que é realizada pelo cruzamento uniforme, para que os novos indivíduos criados sejam factíveis. Após a escolha dos pais (através da seleção) é realizado o cruzamento uniforme, ou seja, são escolhidos genes aleatórios dois pais para criação dos filhos, respeitando a regra que se for escolhido o gene do  $Pai_1$  cujo destino de demanda é o 1, a parte dos indivíduos que corresponde ao destino 2 também é levada a esse filho.

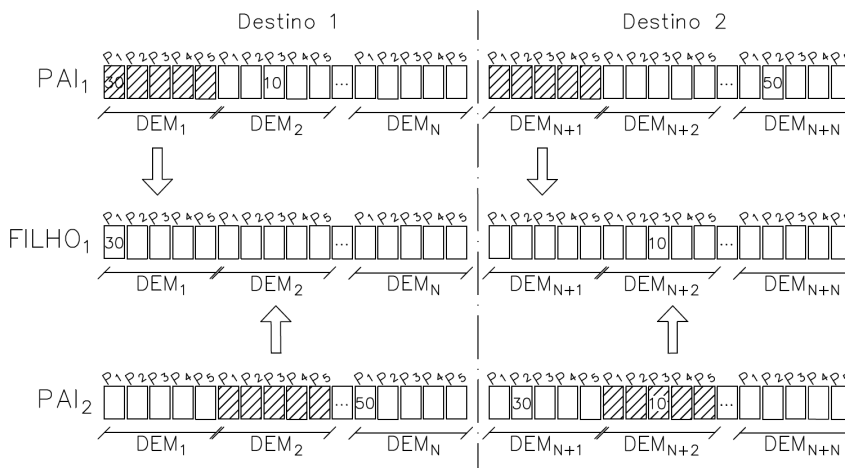


Figura 5.3: *Crossover* uniforme do modelo C5-2

A Figura 5.3 apresenta este processo, após escolhido o  $Pai_1$  e  $Pai_2$  há a escolha aleatória de quais genes irão passar ao  $Filho_1$ , no exemplo tem-se que a escolha do gene 1 que corresponde a  $DEM_1$  do  $Pai_1$  com o destino 1, conseqüentemente o gene do  $Pai_1$   $DEM_{N+1}$  do destino 2 também foi passado ao  $Filho_1$ . O gene 2 foi escolhido para ser do  $Pai_2$ , assim a  $DEM_2$  e  $DEM_{N+2}$  são transferidas ao  $Filho_1$ . Este processo é realizado para todos os genes até a formação completa do  $Filho_1$ .

### 5.1.3 Modelo C5-3 (ILP-FA)

Para a implementação computacional do Modelo C5-3 ILP-FA com o MATLAB® desenvolvido para rede OTN/WDM, segue o descritivo apresentado na Seção 4.1.3. O modelo C5-3 traz a técnica de algoritmo *firefly*, e para este modelo a solução permitida é apenas por atendimento de demanda por caminho único. O fluxograma do Modelo C5-3 para rede OTN/WDM segue o apresentado na Figura 5.4.

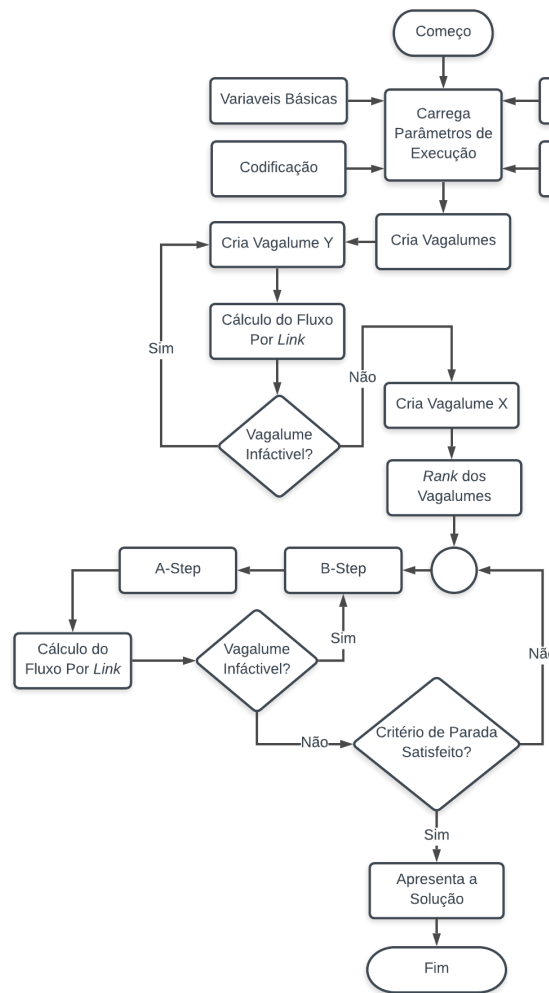


Figura 5.4: Fluxograma do modelo C5-3 para a rede OTN

A etapa de comparação/movimento (*B-Step* e *A-Step*) tem que levar em consideração a multiplicidade de destinos  $TN$ . Para isto a realização do *B-Step* e *A-Step* ocorre no  $DEM_1$  e toda ação feita nas  $DEM$  para este destino também é realizada nas demandas correspondentes do  $DEM_2$ .

#### 5.1.4 Modelo C5-4 (ILP-HFA)

Para a implementação computacional do Modelo C5-4 ILP-HFA com o MATLAB® desenvolvido para rede OTN/WDM, que traz a técnica dos algoritmos *firefly* e genético, segue o descritivo da Seção 3.7 e 5.1.3. O fluxograma do Modelo C5-4 para rede OTN/WDM segue o apresentado na Figura 5.5.

Após o término da comparação/movimento (*B-Step* e *A-Step*) de todos os *fireflies* é realizado um novo *ranking* e as duas soluções melhores (maior intensidade de luz) a cada iteração,

passarão pelos operadores de *crossover* e mutação do algoritmo genético, sendo que, as probabilidades de cruzamento e mutação são 100%.

Assim a rotina *Crossover* é executada, onde é utilizado o *crossover* uniforme (Seção 5.1.2). O *crossover* é realizado na parcela *Y*, após cada *firefly* gerado tem sua parcela *X* criada, permitindo a sua avaliação. Assim é necessário calcular o fluxo total (*Cálculo do Fluxo Por Link*) em cada *link* e verificar se as modularidades atendem esse fluxo. Caso nenhum deles sejam factíveis o operador de *crossover* é realizado novamente.

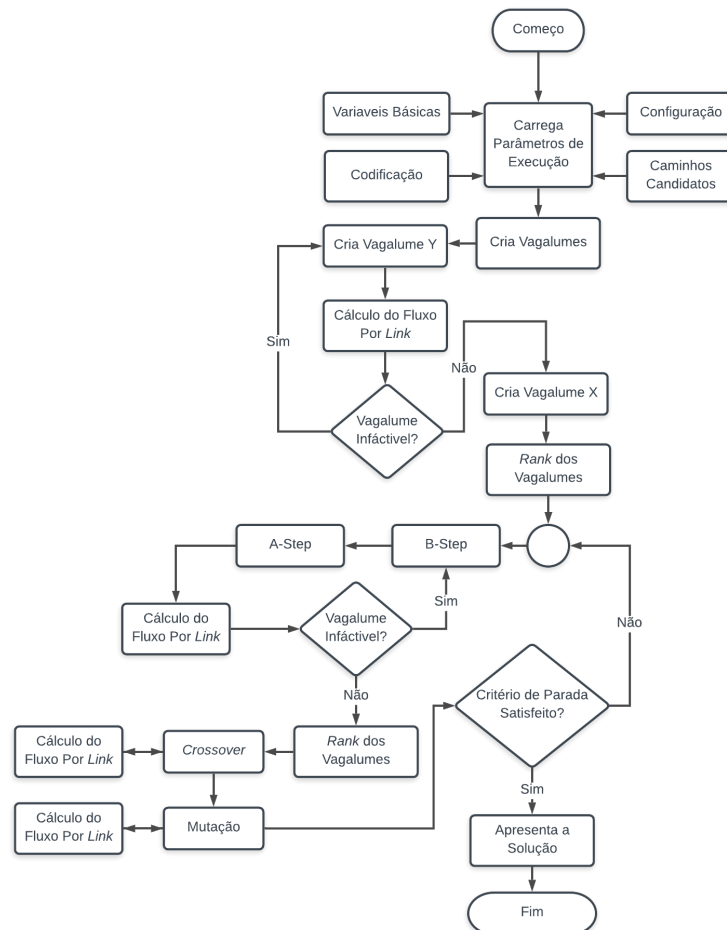


Figura 5.5: Fluxograma do modelo C5-4 para a rede OTN

Realizado o *Crossover* é acionada a rotina *Mutaçao*. A mutação realiza alterações aleatórias nos caminhos escolhidos para escoar a demanda prevista, como ela ocorre na parte *Y*, a parcela *X* deve ser criada novamente e realizado um teste (*Cálculo do Fluxo Por Link*) que verificar se este *firefly* que sofreu a mutação é factível. Os dois melhores *fireflies* possíveis entre pais e filhos são mantidos na primeira e na segunda posição da população e o restante é eliminado.

## 5.2 Implementação Computacional do Modelos C5-5 ao C5-8 para a Rede OTN/WDM

A seguir são apresentadas as implementações computacionais para redes de transportes ópticas OTN/WDM com a modelagem *fuzzy*. Essas implementações têm como referência os conceitos apresentados na Seção 3.4 do Capítulo 3.

### 5.2.1 Modelo C5-5 (ILP-Fuzzy)

Para a implementação computacional do Modelo C5-5 ILP-Fuzzy com o MATLAB®, possuindo dados de demanda imprecisos (números *fuzzy* trapezoidais), a referência seguida é o Modelo C4-4, com a diferença que o modelo aqui tratado é o ILP.

A presença nos números *fuzzy* faz com que o conjunto de restrições de balanço de demanda deixem de ser de igualdade, fazendo assim que não possua a matriz  $A_{eq}$  e o vetor  $b_{eq}$ , ficando assim somente com a matriz  $A$  e o vetor  $b$ , conforme indicado na Figura 5.6.

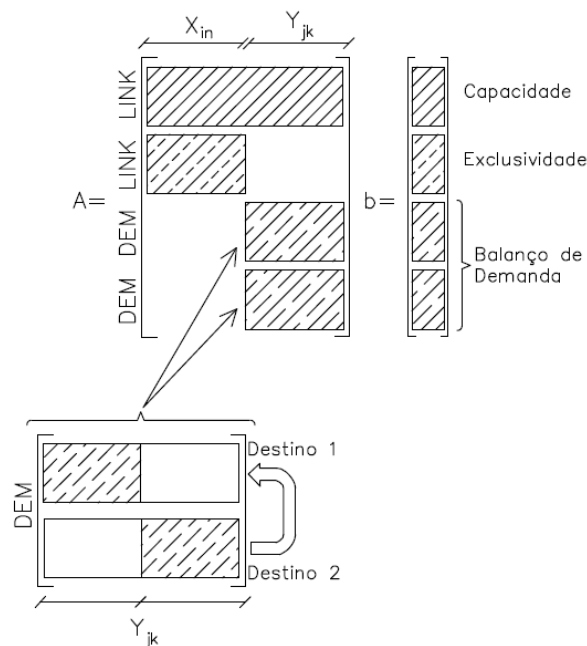


Figura 5.6: Matrizes de restrições do Modelo C5-5 para a rede OTN/WDM

A Matriz  $A$  apresenta 2 demandas, que ocorrem pelo fato de o conjunto de restrições de balanço de demanda contemplarem a modelagem *fuzzy*. Conforme a particularidade desta rede em estudo, para cada demanda prevista o nó de destino tem  $TN$  possibilidades, assim há a necessidade

de outro ajuste, que é duplicação das restrições de demanda (escoada pelo destino 1 ou destino 2). A Figura 5.6 apresenta este processo, que é realizado para os dois conjuntos de restrições de demanda da matriz  $A$ , cuja resolução foi descrita na Seção 4.2.1.

### 5.2.2 Modelo C5-6 (ILP-Fuzzy-GA)

Para a implementação computacional do Modelo C5-6 ILP-Fuzzy-GA com o MATLAB® desenvolvido para rede OTN/WDM, possuindo dados de demanda imprecisos, as referências seguidas são os Modelos C5-3 e C5-5. O fluxograma do Modelo C5-6 para rede OTN/WDM segue o apresentado na Figura 5.7.

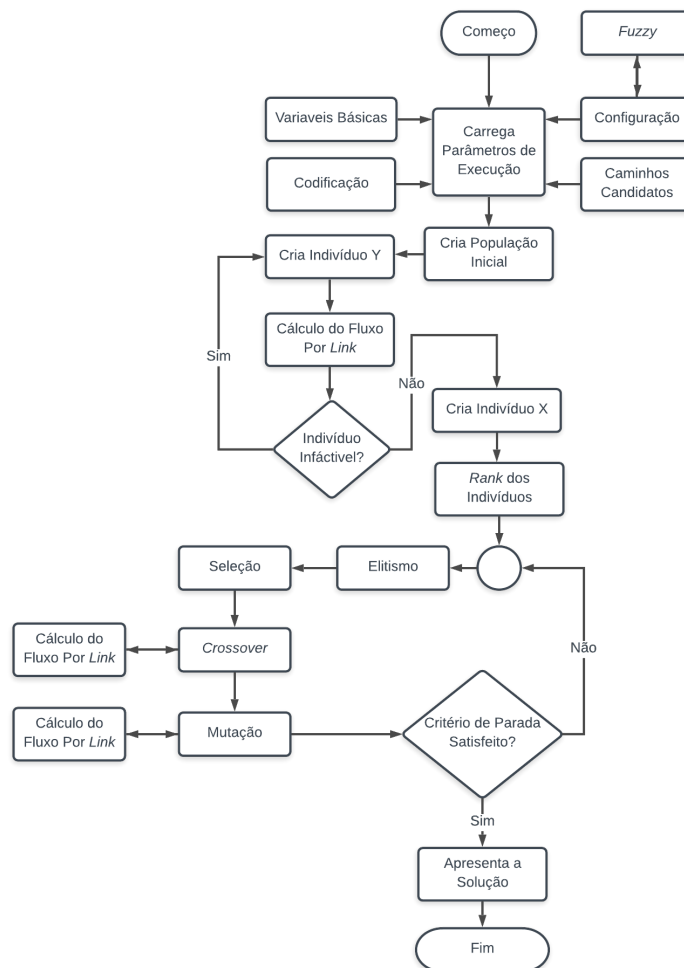


Figura 5.7: Fluxograma do modelo C5-6 para a rede OTN

Como a presença de números *fuzzy* altera o procedimento de resolução, há a necessidade de um ajuste para a implementação do Modelo C5-4, que ocorre está na rotina *Configuração*, pois as demandas a serem carregadas devem ser imprecisas (números *fuzzy* trapezoidais). Com isso, o

usuário deve-se definir o grau de confiança  $\alpha \in [0,1]$ , que expressa o quanto os dados de demanda são precisos. Com essas informações (das demandas imprecisas e valor de  $\alpha$ ) é preciso transformar os números *fuzzy* de maneira a permitir o seu tratamento.

Este processo é denominado defuzzificação (*Fuzzy*), e consiste em encontrar um valor de trabalho (*crisp*) para o número *fuzzy* tratado. O número *fuzzy* é reduzido a um intervalo do qual se toma o limitante inferior como valor de trabalho (problema de minimização), assim a solução é  $\alpha$ -dependente).

### 5.2.3 Modelo C5-7 (ILP-*Fuzzy*-FA)

Para a implementação computacional do Modelo C5-7 ILP-*Fuzzy*-FA com o MATLAB® desenvolvido para rede OTN/WDM, possuindo dados de demanda imprecisos, as referências seguidas são os Modelos C5-5 e C5-6. O fluxograma do Modelo C5-7 para rede OTN/WDM segue o apresentado na Figura 5.8.

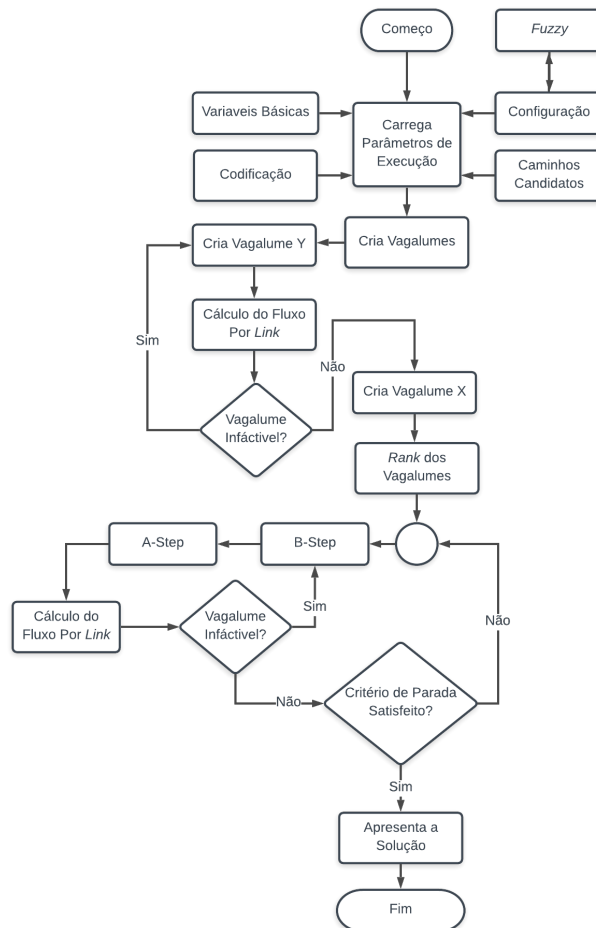


Figura 5.8: Fluxograma do modelo C5-7 para a rede OTN

### 5.2.4 Modelo C5-8 (ILP-Fuzzy-HFA)

Para a implementação computacional do Modelo C5-8 com o MATLAB® desenvolvido para rede OTN/WDM, possuindo dados de demanda imprecisos (números *fuzzy* trapezoidais), as referências seguidas são os Modelos C5-5, C5-6 e C5-7. O fluxograma do Modelo C5-8 para rede OTN/WDM segue o apresentado na Figura 5.9.

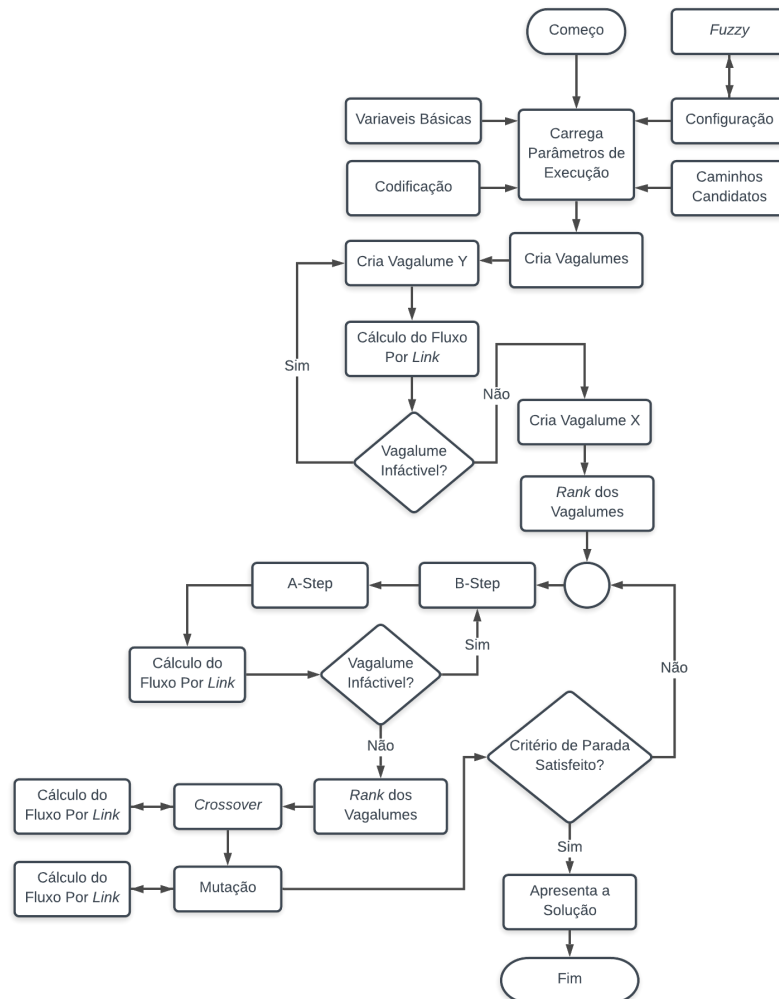


Figura 5.9: Fluxograma do modelo C5-8 para a rede OTN

## 5.3 Comentários Finais

Este capítulo apresentou os modelos específicos para a tecnologia OTN/WDM em redes de transportes ópticas. A Seção 5.1 apresentou o detalhamento para a rede OTN/WDM, com destaque para as modularidades e a possibilidade de escoamento da demanda de um nó de origem

para múltiplos nós de destino e essa demanda pode ser escoada por apenas um único caminho em todos os Modelos C5-1 ao C5-8. As aplicações dos Modelos C5-1, C5-2, C5-3 e C5-4 aqui descritos estão destacadas no Capítulo 7.

---

## Capítulo 6. RESULTADOS DAS APLICAÇÕES DOS MODELOS PARA REDES DE TRANSPORTE ÓPTICAS PDH

---

Este capítulo apresenta e discute os resultados computacionais oriundos da aplicação da metodologia de planejamento discutida no Capítulo 4, onde os modelos gerais foram adaptados para incorporar a modelagem *fuzzy*, tornando-o capaz de permitir a adoção de dados imprecisos para a demanda dos serviços, e também o algoritmo genético e *firefly*. Os modelos são implementados no *software* MATLAB®, manipulados em microcomputador com ambiente Microsoft Windows 10®, processador Intel Core i5 2.3GHz e memória RAM de 4GB.

### 6.1 Informações Relevantes da Rede PDH

A ferramenta computacional desenvolvida foi testada em uma das instâncias contidas na SNDlib [19]. A biblioteca SNDlib consiste de duas partes, a parte de rede que descreve nós, *links*, demandas, capacidades, parâmetros de custos e outros dados de planejamento e a parte do modelo que descreve parâmetros de projeto especificando, por exemplo, se os *links* são direcionados ou não direcionados, se o roteamento de uma demanda pode ser dividido em vários caminhos ou não, ou qual modelo de capacidade ou se o conceito de sobrevivenciabilidade deve ser utilizado. Uma parte importante do propósito da biblioteca é que seus usuários identifiquem os modelos matemáticos mais eficazes. A utilização da biblioteca SNDlib pode ser encontrada na literatura especializada, como por exemplo [84] [106] [107] [108].

Atualmente, a biblioteca SNDlib contém 22 topologias de redes. Cada uma destas redes foi combinada com vários modelos da biblioteca para a construção de 830 instâncias. As instâncias de rede incluídas na SNDlib têm diferentes cenários. Alguns exemplos de rede foram fornecidos por operadores de rede ou por fabricantes de equipamentos de rede, diretamente ou através de parceiros acadêmicos.

Para este estudo foi utilizado a rede PDH. A rede escolhida é composta de 11 nós (vértices) e 34 *links* (arestas), com possibilidade de alocação de sistemas de transmissão com níveis

hierárquicos de até 565,148 Mbps, com capacidade de 1920 canais E1 (unidade de roteamento base de 2,048 Mbps). A Figura 6.1 apresenta a topologia física da rede em estudo.

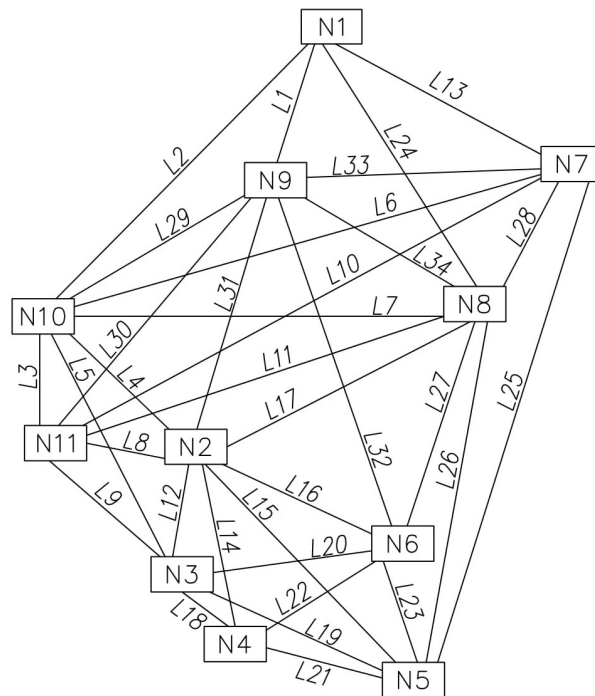


Figura 6.1: Topologia da rede PDH

A instância da biblioteca SNDlib utilizada neste trabalho possui as seguintes características: as demandas e os *links* devem obedecer a mesma forma de roteamento sendo não direcionais (U-U), a capacidade dos *links* é explícita (E), não possui custo fixo de instalação (N), as demandas podem ser escoadas por mais de um caminho (C), todos os caminhos existentes podem ser utilizados (A), e não estão previstas infraestruturas de garantia de sobrevivência da rede a possíveis falhas (N). A Tabela 6.1 resume essas informações com os parâmetros considerados.

Tabela 6.1: Instância da SNDlib

Filtro de Modelo	
Modelo de Demanda: Demanda não direcional	(U)
Modelo de <i>Link</i> : <i>Links não direcionais</i>	(U)
Modelo de Cap. do <i>Link</i> : Cap. de <i>links</i> explícitos	(E)
Modelo de carga fixa: Sem custo de carga fixa	(N)
Modelo de roteamento: Por mais de um Caminho	(C)
Modelo de caminho admissível: Todos os caminhos	(A)
Modelo <i>hop-limit</i> : Sem <i>hope limits</i>	(N)
Modelo de sobrevivência: Sem sobrevivência	(N)

No total, 24 demandas previstas devem ser atendidas integralmente, conforme Tabela 6.2.

Tabela 6.2: Valores de demandas previstos

<b>Demanda</b>	<b>Nó de Origem</b>	<b>Nó de Destino</b>	<b>Valor da Demanda (xE1)</b>
$d_1$	N9	N2	384
$d_2$	N3	N4	215
$d_3$	N7	N8	212
$d_4$	N10	N3	197
$d_5$	N9	N11	160
$d_6$	N2	N8	160
$d_7$	N2	N5	144
$d_8$	N1	N7	138
$d_9$	N3	N5	124
$d_{10}$	N6	N8	115
$d_{11}$	N1	N10	115
$d_{12}$	N10	N11	364
$d_{13}$	N5	N8	108
$d_{14}$	N4	N5	105
$d_{15}$	N9	N8	100
$d_{16}$	N11	N3	99
$d_{17}$	N5	N6	95
$d_{18}$	N2	N3	278
$d_{19}$	N11	N2	266
$d_{20}$	N9	N10	263
$d_{21}$	N1	N9	258
$d_{22}$	N9	N7	247
$d_{22}$	N2	N6	237
$d_{24}$	N2	N4	237

O Anexo I apresenta o custo de instalação de cada modularidade (capacidade) da tecnologia candidata, em canais E1 (30, 480 e 1920), em cada *link* previsto. O custo do *link* é contabilizado caso ele seja escolhido para ser parte integrante da rede solução.

## 6.2 Estudo de Caso 01: Rede PDH com Modelo C4-1 (MILP)

O modelo aqui utilizado é o modelo geral de programação linear inteira mista (Modelo C4-1) descrito no Capítulo 4 Seção 4.1.1. Conforme já dito, diferentes parâmetros podem ser utilizados como argumentos para o modelo desenvolvido. O modelo pode ser executado para diferentes variáveis de entrada, ou seja, diferentes cenários de rede de transporte óptica, diferentes tipos de tecnologias de transmissão e diferentes matrizes de interesse de tráfego. Assim, para as mesmas variáveis de entrada, se os parâmetros dados são diferentes, como por exemplo os caminhos pré-computados para cada demanda, as soluções alcançadas também irão mudar.

O modelo desenvolvido foi testado na rede de dimensão média, descrita na seção 6.1. Para cada demanda prevista (Tabela 6.2),  $k=5$  caminhos foram gerados. Este valor de  $k$  permite uma boa

variedade de combinações de caminhos a serem analisados mantendo o tempo de processamento em um valor relativamente baixo. Foram utilizadas duas métricas para a candidatura dos caminhos:

- Cenário-01 - Geração automática de caminhos: utiliza uma versão modificada do algoritmo de *k-caminhos* mais curtos proposto em [67]. A distância total compreendida entre o nó de origem e o nó de destino, em *km*, é utilizada como fator de decisão;
- Cenário-02 – Geração pela experiência do planejador: A candidatura dos caminhos é feita de forma manual. Este procedimento procura valorizar a experiência do planejador no processo decisório, através do seu conhecimento da rede, ao escolher os *links* que compõem um determinado caminho candidato.

A Tabela 6.3 mostra os resultados comparativos entre a SNDlib e os modelos desenvolvido nesta etapa.

Tabela 6.3: Resultados SNDlib x Cenários

<b>Resultados</b>	<b>SNDlib</b>	<b>Cenário-01</b>	<b>Cenário-02</b>
Custo (\$)	11.114.202,00	11.467.723,00	11.114.202,00
Capacidade Instalada (xE1)	6.780	7.260	6.780
Capacidade Utilizada Média (%)	91,38	86,58	90,22
Tempo (s)	50,00	3,50	1,30

A rede solução do Cenário-02 é ligeiramente diferente daquela obtida na SNDlib, embora apresente o mesmo custo de instalação e praticamente a mesma taxa média de ocupação (em torno de 90%). A rede solução alcançada pelo Cenário -01 é a que oferece maior folga média na utilização dos seus *links* (em torno de 5% a mais). Mas esta vantagem é comprometida com a necessidade de um orçamento 3,18% mais elevado.

As topologias das redes obtidas com a simulação dos Cenário-01 e Cenário-02 podem ser conferidas nas Figuras 6.2, respectivamente. Estão indicados o (*fluxo escoado/capacidade alocada*) em cada *link* escolhido.

Nos resultados disponibilizados na SNDlib dos 34 *links* que foram candidatados 13 foram instalados, sendo 8 de 480xE1 e 5 de 1.920xE1. Já as redes projetadas pelos Cenário-01 e Cenário-02 privilegiaram os *links* com capacidade de 480xE1 (15 *links*). Mesmo apresentando uma folga média maior na rede, o Cenário-01 não alocou *links* de alta capacidade (1920xE1) [109].

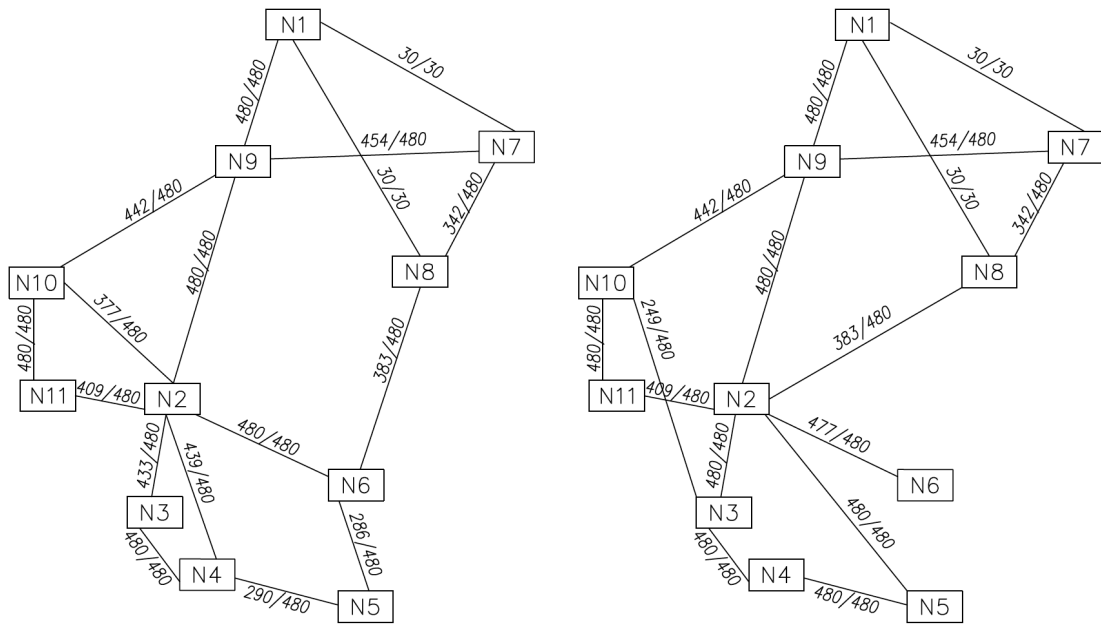


Figura 6.2: Rede solução Cenário-01 e Cenário-02

### 6.3 Estudo de Caso 02: Rede PDH com Modelo C4-4 (MILP-Fuzzy)

O modelo aqui utilizado é o modelo de programação linear inteira mista com *fuzzy* (MILP-Fuzzy) (Modelo C4-4) descrito no Capítulo 4 Seção 4.2.1. A ferramenta computacional aqui desenvolvida foi testada também na instância contida na SNDlib apresentada na Figura 5.1 com os parâmetros da Tabela 6.1. A Tabela 6.4 apresenta os valores para as 24 demandas prevista (em canais E1) e também indica os valores médios ( $V_m$ ) das demandas, que corresponde ao valor da demanda da Tabela 6.2 da Seção 6.1.1. A demanda é tratada como um número *fuzzy* modelado por uma função de pertinência trapezoidal. Os custos dos sistemas de transmissão a serem dimensionados, em função de qual *link* deve ser alocado, encontra-se no Anexo I.

O objetivo é avaliar o impacto da variação das demandas previstas na configuração e custo da rede a ser implantada. Variando-se o fator de confiança,  $\alpha$ , é possível obter uma margem de mapeamento da instabilidade do mercado, abrangendo variações de demanda de fluxo e de preço de implantação da rede, tornando a modelagem e a aplicação mais realista. Por ser um problema de minimização, e devido à forma como foram modeladas as novas restrições, a curva de defuzzificação acaba por retornar o menor valor de demanda do intervalo *fuzzy* em análise.

Tabela 6.4: Demanda prevista imprecisa

Demanda	Nó de Origem	Nó de Destino	Valor da Demanda (xE1)				
			<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>V<sub>m</sub></i>
$\tilde{d}_1$	N9	N2	268,8	345,6	422,4	499,2	384
$\tilde{d}_2$	N3	N4	150,5	193,5	236,5	279,5	215
$\tilde{d}_3$	N7	N8	148,4	190,8	233,2	275,6	212
$\tilde{d}_4$	N10	N3	137,9	177,3	216,7	256,1	197
$\tilde{d}_5$	N9	N11	112	144	176	208	160
$\tilde{d}_6$	N2	N8	112	144	176	208	160
$\tilde{d}_7$	N2	N5	100,8	129,6	158,4	187,2	144
$\tilde{d}_8$	N1	N7	96,6	124,2	151,8	179,4	138
$\tilde{d}_9$	N3	N5	86,8	111,6	136,4	161,2	124
$\tilde{d}_{10}$	N6	N8	80,5	103,5	126,5	149,5	115
$\tilde{d}_{11}$	N1	N10	80,5	103,5	126,5	149,5	115
$\tilde{d}_{12}$	N10	N11	254,8	327,6	400,4	473,2	364
$\tilde{d}_{13}$	N5	N8	75,6	97,2	118,8	140,4	108
$\tilde{d}_{14}$	N4	N5	73,5	94,5	115,5	136,5	105
$\tilde{d}_{15}$	N9	N8	70	90	110	130	100
$\tilde{d}_{16}$	N11	N3	69,3	89,1	108,9	128,7	99
$\tilde{d}_{17}$	N5	N6	66,5	85,5	104,5	123,5	95
$\tilde{d}_{18}$	N2	N3	194,6	250,2	305,8	361,4	278
$\tilde{d}_{19}$	N11	N2	186,2	239,4	292,6	345,8	266
$\tilde{d}_{20}$	N9	N10	184,1	236,7	289,3	341,9	263
$\tilde{d}_{21}$	N1	N9	180,6	232,2	283,8	335,4	258
$\tilde{d}_{22}$	N9	N7	172,9	222,3	271,7	321,1	247
$\tilde{d}_{23}$	N2	N6	165,9	213,3	260,7	308,1	237
$\tilde{d}_{24}$	N2	N4	165,9	213,3	260,7	308,1	237

Para cada demanda prevista (Tabela 6.4),  $k=5$  caminhos foram gerados. A geração dos caminhos candidatos foi realizada pelo algoritmo do  $k$ -caminhos mais curtos (Cenário-03) com a distância total compreendida entre o nó de origem e o nó de destino, em km, é utilizada como fator de decisão, e também pela experiência do planejador (Cenário-04). Considerando a possibilidade de escoamento de cada demanda prevista por cinco caminhos distintos, as soluções de rede obtidas, a partir do grau de confiança ( $\alpha$ ) do planejador encontra-se na Tabela 6.5 (Cenário-03) e Tabela 6.6 (Cenário-04). Pode-se observar para cada grau de confiança os *links* (30xE1, 480xE1 e 1920xE1) alocados, a quantidade de folga em canais E1 para cada grau de confiança e também o tempo de processamento.

O aumento no valor de  $\alpha$  aumenta também o valor da demanda prevista e, consequentemente, o custo total da rede. Em nenhum dos casos foi alocado *link* de capacidade de 1920xE1, isso ocorre devido aos valores de demanda prevista não estarem na mesma proporção desta capacidade. É possível observar que algumas mudanças de  $\alpha$ , seja no Cenário-03 ou no

Cenário-04, mantém a mesma rede solução (mesmo custo) porém a folga diminui. Isso deve-se ao fato de que ao aumentar o grau de confiança ( $\alpha$ ) aumenta-se os níveis de demanda previstos para serem atendidos.

Tabela 6.5: Resultados Cenário-03

Grau de confiança ( $\alpha$ )	Custo da Rede (\$)	Links 30	Links 480	Links 1920	Folga em E1 (%)	Tempo de Processamento (s)
0,0	10.167.286,00	7	12	0	5,2	9,77
0,1	10.376.035,00	5	13	0	10,0	11,78
0,2	10.564.229,00	1	14	0	17,1	13,95
0,3	10.627.864,00	1	14	0	18,9	11,31
0,4	10.645.714,00	1	14	0	18,1	7,49
0,5	10.743.209,00	1	14	0	15,9	5,61
0,6	10.850.357,00	2	14	0	15,1	5,13
0,7	11.078.698,00	4	14	0	14,1	6,60
0,8	11.157.251,00	5	14	0	14,3	4,30
0,9	11.335.135,00	1	15	0	12,3	4,95
1,0	11.467.723,00	2	14	0	14,4	3,94

Pode-se observar que ao aumentar o valor de  $\alpha$  o tempo de processamento diminui, ou seja, os maiores tempos de processamento foram para  $\alpha$  em próximo de zero, isto é, para aqueles cenários com maior intervalo de demanda (diferença entre demanda máxima e demanda mínima) que é a diferença entre limitante superior e limitante inferior das restrições (4.6) e (4.7) do Modelo C4-2.

Tabela 6.6: Resultados Cenário-04

Grau de Confiança ( $\alpha$ )	Custo da Rede (\$)	Links 30	Links 480	Links 1920	Folga em E1 (%)	Tempo de Processamento (s)
0,0	9.844.781,00	2	13	0	8,6	3,92
0,1	10.018.020,00	0	13	0	12,8	5,07
0,2	10.121.458,00	1	12	0	10,8	3,90
0,3	10.250.866,00	2	12	0	7,8	4,05
0,4	10.353.509,00	3	13	0	7,9	2,80
0,5	10.608.350,00	5	12	0	6,9	4,86
0,6	10.715.498,00	6	13	0	7,7	3,69
0,7	10.981.614,00	1	12	0	14,7	4,28
0,8	10.981.614,00	1	13	0	13,0	2,43
0,9	10.981.614,00	1	13	0	13,1	1,61
1,0	11.114.202,00	2	12	0	12,2	1,25

As topologias das redes obtidas com a simulação dos Cenário-03 e Cenário-04 podem ser conferidas nas Figuras 6.3 e 6.4, respectivamente. Estão indicadas a relação *fluxo escoado/capacidade alocada* em cada *link* alocado e dimensionado.

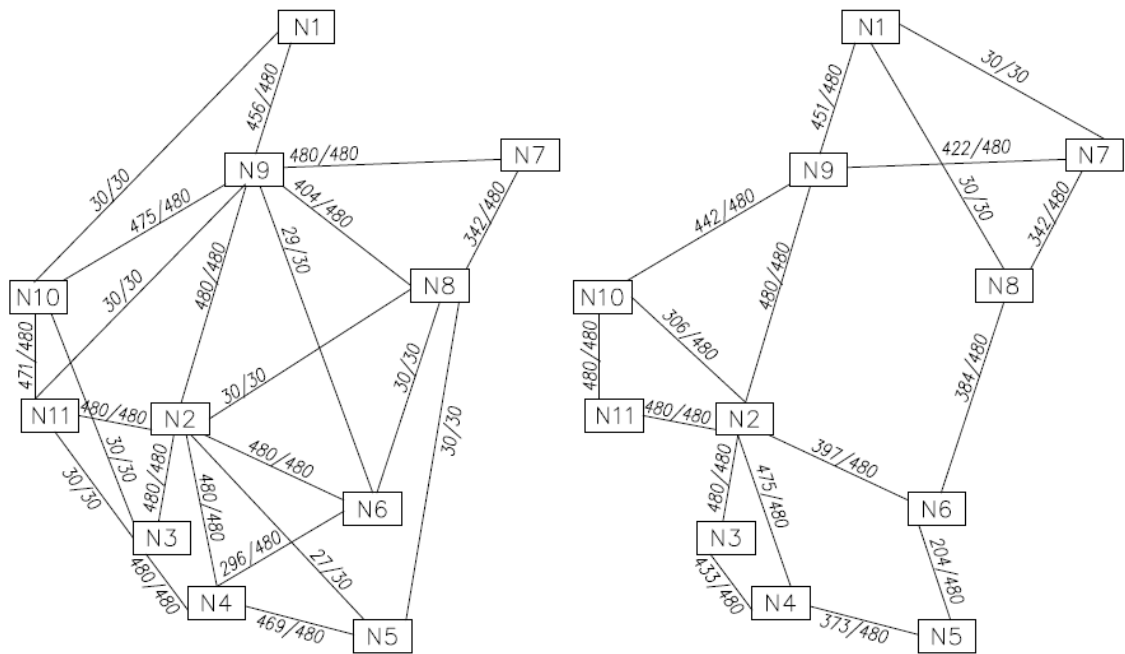


Figura 6.3: Rede solução do Cenário-03 para  $\alpha=0$  e para  $\alpha=1$

A primeira rede refere-se à solução do cenário de menor confiança nos dados de demanda ( $\alpha=0$ ) e a segunda rede foi dimensionada para atender os valores de demanda com maior possibilidade de ocorrência ( $\alpha=1$ ). Observa-se que o dimensionamento dos enlaces privilegiou o atendimento através de *links* de 480xE1 em ambos os casos (Cenário-03 e Cenário-04).

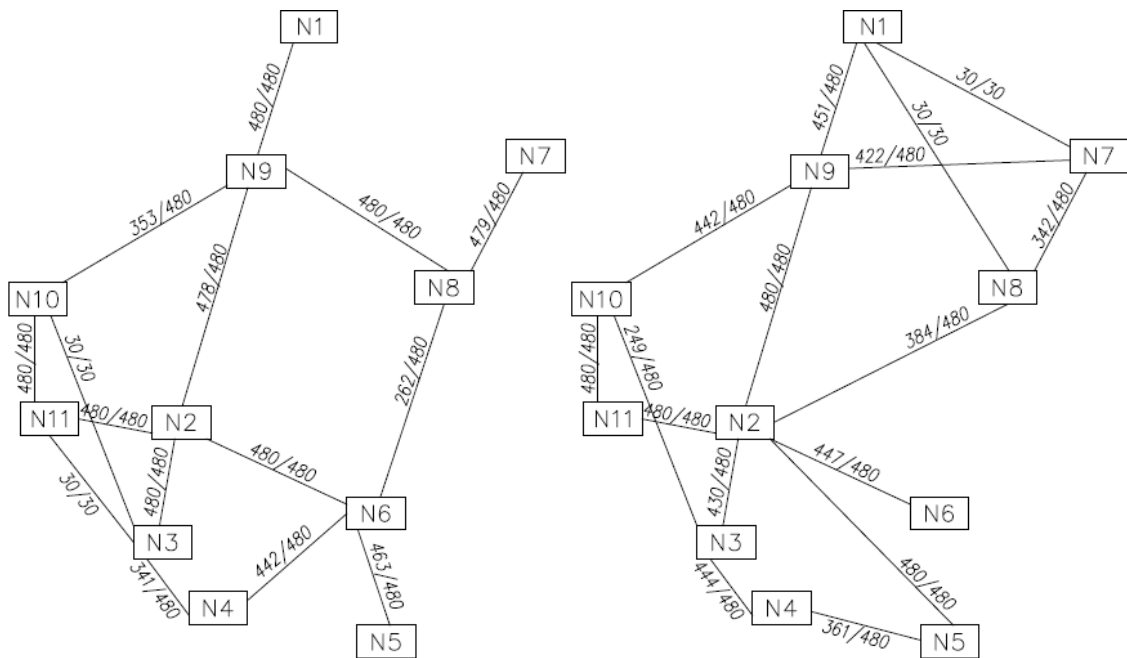


Figura 6.4: Rede solução do Cenário-04 para  $\alpha=0$  e para  $\alpha=1$

Para o grau de confiança de 100% ( $\alpha=1$ ), têm-se os mesmos valores de demanda prevista para o cenário da biblioteca SNDlib, que possui um custo de implantação da rede de \$11.114.202 (tempo de processamento=50s). A solução do Cenário-03 ficou 3,18% mais cara para a implantação da rede, já o Cenário-04 possui o mesmo custo do valor da biblioteca SNDlib.

No resultado disponibilizado na SNDlib dos 34 *links* que foram candidatados 13 foram instalados, sendo 8 de 480xE1 e 5 de 1.920xE1. Já as redes projetadas pelos Cenário-03 e Cenário-04 privilegiaram os *links* com capacidade de 480xE1 e não alocaram *links* de alta capacidade (1920xE1) [110].

## 6.4 Estudo de Caso 03: Rede PDH com Modelo C4-2 (ILP-GA)

O sistema de apoio à decisão aqui aplicado (Modelo C4-2) através da computação evolucionária foi testado em uma rede de dimensão média, descrita na Seção 6.1. Os parâmetros utilizados estão na Tabela 6.1, porém com uma diferença: que as demandas podem ser escoadas por apenas um dos caminhos (S) candidatos.

Para cada demanda prevista (Tabela 6.2),  $k=5$  caminhos foram gerados. A candidatura dos *k-caminhos* foi a geração automática utilizando uma versão modificada do algoritmo de *k-caminhos* mais curtos. O fator de decisão é a distância total (*km*) entre o nó de origem e o nó de destino.

Tabela 6.7: Configurações do Cenário-05

Parâmetro	Configuração do GA				
	1	2	3	4	5
População	100	200	500	100	500
Gerações	50	50	500	50	50
Crossover (Probabilidade)	0,9	0,6	0,9	0,9	0,6
Mutação (Probabilidade) / Quant. Alterações	0,05 / 5	0,10 / 5	0,05 / 5	0,05 / 5	0,10 / 5

A Tabela 6.7 descreve as cinco configurações do algoritmo genético Cenário-05 utilizadas para avaliar a rede. Estas configurações do GA foram escolhidas de forma a avaliar o desempenho da metodologia ao privilegiar alguns de seus parâmetros, além do objetivo principal que é dimensionar a rede a custo mínimo.

A Tabela 6.8 apresenta os resultados comparativos entre Cenário-05 desenvolvido aqui e aquele indicado na SNDlib. Em termos de custo da rede dimensionada, a metodologia proposta neste trabalho apresentou desempenho superior ao da SNDlib em todas as configurações do GA. Vale observar que para obter um custo mais baixo o GA dimensionou a rede com uma carga instalada

total menor (chegando a até 40% a menos), comprometendo a ocupação da rede (capacidade média utilizada até 7% a mais).

Tabela 6.8: Resultados Cenário-05 proposto

Metodologia		Custo (\$)	Carga Instalada (Canais E1)	Capacidade Utilizada (%)	Tempo (s)
SNDlib <sup>1</sup>		14.883.708	13.440	65,08	3.600*
GA Proposto	1	14.765.752	11.040	70,9	1.133
	2	12.966.484	8.160	71,9	3.200
	3	14.495.788	10.560	67,3	5.838
	4	14.511.654	10.080	67,5	925
	5	13.785.492	9.600	65,2	1.001

<sup>1</sup>Resultado da biblioteca SNDlib \*Tempo limite

A metodologia adotada neste trabalho obteve redes com níveis de investimento inferiores ao da SNDlib, só que necessitando de tempos de simulação computacional bem menores. Apenas o GA-3 apresentou tempo computacional maior que o da SNDlib. Este resultado evidencia que o GA configurado para uma população com quantidade elevada de indivíduos e acrescido de um número elevado de gerações compromete o seu desempenho computacional e não garante as melhores soluções de rede.

A rede de menor custo encontrada evidencia que a diversidade é um fator relevante na obtenção da melhor solução (configuração GA-2). Uma quantidade maior de operações de *crossover* e de mutação mostrou ser mais eficiente do que aumentar o tamanho da população e o número de gerações.

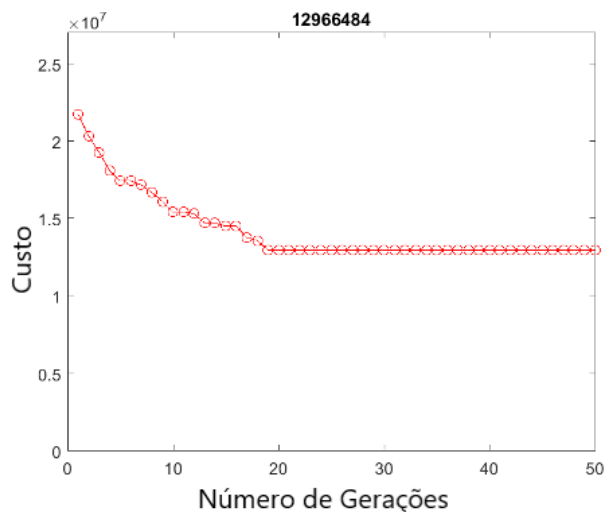


Figura 6.5: Custo da rede GA-2 versus gerações

A Figura 6.5 descreve o comportamento do custo da rede obtida com o GA-2, conforme se avança no número de gerações. As reduções no custo de rede ocorrem até em torno da vigésima

geração, evidenciando ainda mais a importância de se investir mais na diversidade do que na quantidade de soluções.

A topologia da rede solução obtida com a simulação GA-2 pode ser conferida na Figura 6.6. Estão indicados o (*fluxo escoado/capacidade alocada*) em cada *link* escolhido. Nos resultados disponibilizados na SNDlib dos 34 *links* que foram candidatados 13 foram instalados, sendo 8 de 480xE1 e 5 de 1.920xE1. Já a rede projetada pelo GA-2 privilegiou os *links* com capacidade de 480xE1 (17 *links*).

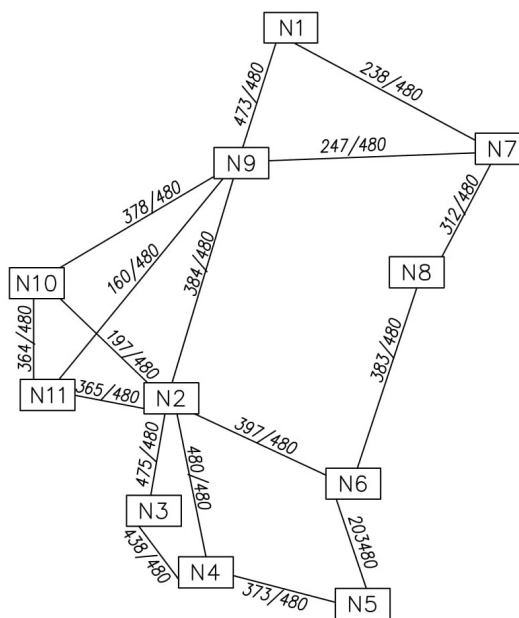


Figura 6.6: Topologia da rede solução GA-2

Na maioria, os resultados de rede obtidos neste Cenário-05 proposto foram melhores, seja pela qualidade das soluções obtidas, seja para o desempenho em termos de tempo computacional necessário. A melhor solução encontrada apresentou uma redução no custo total da rede em torno de 13%.

Embora não seja possível fazer uma comparação completamente fiel quanto ao desempenho computacional, por não conhecer o processo e a métrica de candidatura de caminhos na SNDlib, os resultados alcançados pelos modelos (Cenário-01 ao Cenário-05) apontam que a ferramenta implementada neste trabalho possui um grande potencial de aplicação. Afinal, mesmo a solução ótima sendo fortemente influenciada pelos caminhos pré-computados, a metodologia adotada neste trabalho obteve redes com o mesmo nível de investimento ou menores da SNDlib, só que necessitando de tempos de simulação computacional bem menores [111].

## 6.5 Comentários Finais

Este capítulo apresentou as aplicações dos Modelos C4-1 (MILP), C4-2 (MILP-*Fuzzy*) e C4-3 (ILP-GA) para redes de transporte ópticas PDH. Em termos de qualidade das soluções alcançadas vale destacar que a metodologia desenvolvida foi confrontada com os resultados de um repositório *on-line* para estudos de redes de transporte ópticas. Em sua maioria, os resultados de rede obtidos foram melhores, seja pela qualidade das soluções obtidas, seja para o desempenho em termos de tempo computacional necessário.

---

## Capítulo 7. RESULTADOS DAS APLICAÇÕES DOS MODELOS PARA REDES DE TRANSPORTE ÓPTICAS OTN/WDM

---

Este capítulo apresenta e discute os resultados computacionais oriundos da aplicação da metodologia de planejamento discutida no Capítulo 5, onde o modelo geral ILP foi adaptado para incorporar a modelagem *fuzzy*, tornando-o capaz de permitir a adoção de dados imprecisos para a demanda dos serviços, e também o algoritmo genético e *firefly*. Os modelos são implementados no *software* MATLAB®, manipulados em microcomputador com ambiente macOS®, processador Intel Core i5 2.3GHz e memória RAM de 8GB.

### 7.1 Informações Relevantes da Rede OTN/WDM

A metodologia pode ser aplicada a diferentes cenários de rede de transporte óptica, diferentes tipos de tecnologias de transmissão e diferentes matrizes de interesse de tráfego. Naturalmente, para as mesmas variáveis de entrada, se os parâmetros dos dados são diferentes, como por exemplo os caminhos pré-computados para cada demanda, as soluções alcançadas também irão mudar.

Com o objetivo de se avaliar um cenário de aplicação bem próximo da realidade, a metodologia utilizada para elaboração dos dados de rede foi a integração da equipe junto a uma empresa de telecomunicações do Brasil. Nesta parceria foram coletadas informações relevantes, tais como: localização de pontos de demanda, distâncias entre as localidades, topologia de rede, custos de equipamentos e de rede óptica.

A rede OTN/DWDM estudada pode assumir três modelos hierárquicos, com capacidade de transmissão de 40, 100 e 400 *Gbps*. A rede real levantada é composta de 27 nós individuais e 50 *links*. A Figura 7.1 apresenta a topologia da rede, incluindo os possíveis *links* a serem alocados e dimensionados.

O interesse de tráfego é definido a partir de cidades onde a operadora atende, mesclando áreas de concessão e expansão. Cada cidade (nó de demanda) possui uma previsão de atendimento para os clientes daquela região. Uma particularidade desta rede é que o tráfego gerado em cada nó

de demanda (nós de origem) necessita ser escoado para os pontos de comunicação (ou de transbordo) com outra WAN (*Wide Area Network*) (nós de destino). Na rede da Figura 7.1, os nós N26 e N27 são os nós de destino.

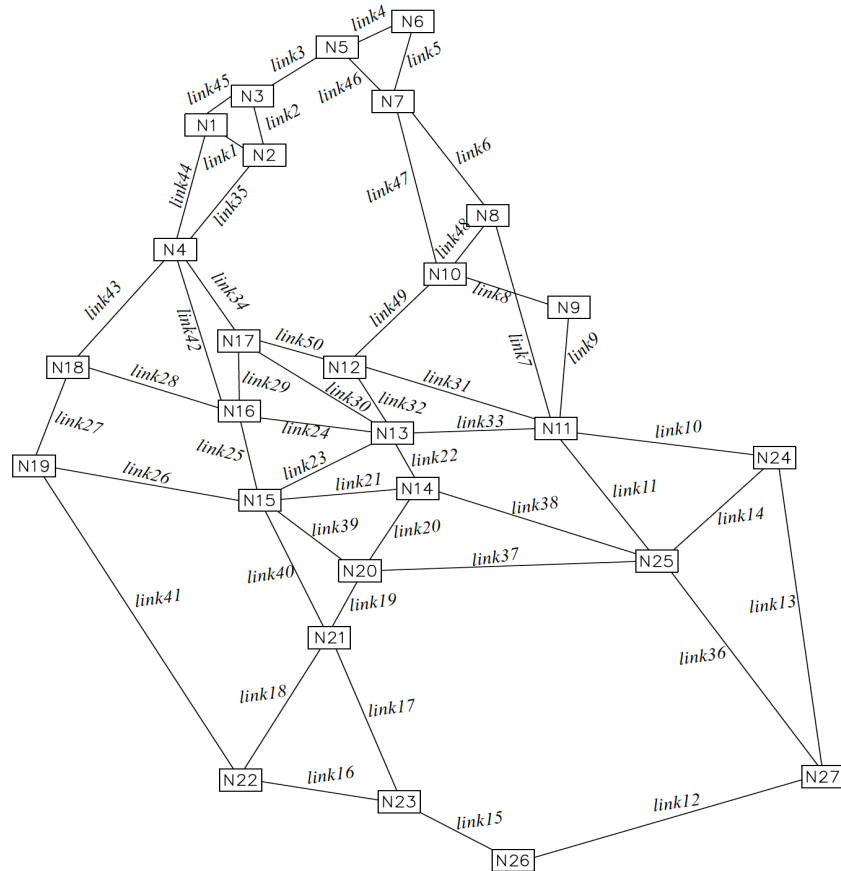


Figura 7.1: Rede *backbone* WDM

A rede apresenta um total de 27 demandas previstas que devem ser atendidas integralmente e direcionadas para os nós de destino. A Tabela 7.1 apresenta um exemplo de matriz de tráfego gerada aleatoriamente no intervalo  $[0,5 \text{ a } 50] \text{ Gbps}$ .

Algumas características da modelagem que são obedecidas na avaliação da rede da Figura 7.1: as demandas e os links obedecem a mesma forma de roteamento, sendo bidirecionais; a capacidade dos *links* é explícita; todos os caminhos existentes podem ser utilizados e a demanda prevista não pode ser escoada por mais de um caminho.

O custo da rede foi levantado a partir de um detalhamento de cada serviço e ativos utilizados para implantação de um *link*. Após levantar os custos separados de cada item foi feito o cálculo total de custo de implantação de cada *link* com as três modularidades da OTN/WDM que estão sendo avaliadas (40, 100, 400 *Gbps*).

Tabela 7.1: Demandas da rede *backbone*

<b>Demanda</b>	<b>Nó de Origem</b>	<b>Nó de Destino</b>	<b>Valor de Demanda (Gbps)</b>
<i>d<sub>1</sub></i>	N1	N26 ou N27	13
<i>d<sub>2</sub></i>	N2	N26 ou N27	0,5
<i>d<sub>3</sub></i>	N3	N26 ou N27	1
<i>d<sub>4</sub></i>	N4	N26 ou N27	5
<i>d<sub>5</sub></i>	N5	N26 ou N27	0,5
<i>d<sub>6</sub></i>	N6	N26 ou N27	37,5
<i>d<sub>7</sub></i>	N7	N26 ou N27	1,5
<i>d<sub>8</sub></i>	N8	N26 ou N27	2,5
<i>d<sub>9</sub></i>	N9	N26 ou N27	12
<i>d<sub>10</sub></i>	N10	N26 ou N27	2,5
<i>d<sub>11</sub></i>	N11	N26 ou N27	7,5
<i>d<sub>12</sub></i>	N12	N26 ou N27	4
<i>d<sub>13</sub></i>	N13	N26 ou N27	20
<i>d<sub>14</sub></i>	N14	N26 ou N27	50
<i>d<sub>15</sub></i>	N15	N26 ou N27	4
<i>d<sub>16</sub></i>	N16	N26 ou N27	10
<i>d<sub>17</sub></i>	N17	N26 ou N27	22,5
<i>d<sub>18</sub></i>	N18	N26 ou N27	11,5
<i>d<sub>19</sub></i>	N19	N26 ou N27	12,5
<i>d<sub>20</sub></i>	N20	N26 ou N27	7,5
<i>d<sub>21</sub></i>	N21	N26 ou N27	19
<i>d<sub>22</sub></i>	N22	N26 ou N27	3,5
<i>d<sub>23</sub></i>	N23	N26 ou N27	25
<i>d<sub>24</sub></i>	N24	N26 ou N27	30
<i>d<sub>25</sub></i>	N25	N26 ou N27	15
<i>d<sub>26</sub></i>	N26	N26 ou N27	13
<i>d<sub>27</sub></i>	N27	N26 ou N27	30

Os custos dos regeneradores também foram especificados de acordo com a modularidade de transmissão e o seu alcance. A Tabela 7.2 apresenta estes valores. Os valores utilizados são relativos. O custo do sistema OTN/WDM de modularidade 40 Gbps (R\$89000,00) é utilizado como base. O custo de rede óptica utilizado representa um cálculo consolidado da média de custo de rede por quilometro, que é 0,012.

Tabela 7.2: Custos dos equipamentos DWDM

<b>Modularidade (Gbps)</b>	<b>Distância até 80Km</b>	<b>Distância maior que 80Km</b>
40	1	1,32
100	1,9	2,22
400	3,92	4,24

## 7.2 Estudo de Caso 01: Rede OTN/WDM com Modelo C5-1 (ILP)

O modelo utilizado aqui é o modelo de programação linear inteira (Modelo C5-1) descrito no Capítulo 5 Seção 5.2. O modelo desenvolvido foi testado na rede de grande porte, descrita na seção 7.1.

O experimento inicial foi realizado no modelo exato para verificar a influência do número de caminhos candidatos para cada demanda. São avaliados a qualidade da solução obtida, bem como o esforço computacional exigido. A Tabela 7.3 apresenta os resultados de acordo com o número de caminhos candidatos para cada demanda entre  $k=10$  (5 caminhos para cada destino) e  $k=20$  (10 caminhos para cada destino).

A métrica utilizada para a candidatura dos  $k$ -caminhos foi a geração automática utilizando uma versão modificada do algoritmo de  $k$ -caminhos mais curtos. A distância total compreendida entre o nó de origem e o nó de destino, em  $km$ , é utilizada como fator de decisão.

Tabela 7.3: Resultados do método exato

Número de Caminhos Candidatos ( $k$ )	Custo	Carga Instalada ( $Gbps$ )	Capacidade Utilizada (%)	Tempo Execução (s)
10	559,63	3340	47,40	2460
12	537,75	3040	52,20	56077
14	531,67	3340	49,70	35566
16	530,96	3340	50,30	64376
18	530,96	3340	50,30	290739
20	530,96	3340	50,30	318140

Pode-se observar na Tabela 7.3 que a solução ótima e o tempo de execução são fortemente influenciados pelos caminhos pré-computados. Isso demonstra que a solução de redes de grande porte através de métodos exatos requer um grande esforço computacional e conseqüentemente um valor elevado no tempo de processamento. Para 16, 18 e 20 caminhados candidatos a solução é a mesma, porém o tempo de processamento aumenta de forma considerável.

A topologia da rede com solução ótima (método exato) para  $k=16$ , 18 e 20 pode ser conferida na Figura 7.2. Em cada *link* escolhido são indicados os fluxos escoados e a capacidade alocada (*fluxo/capacidade*) em  $Gbps$ .

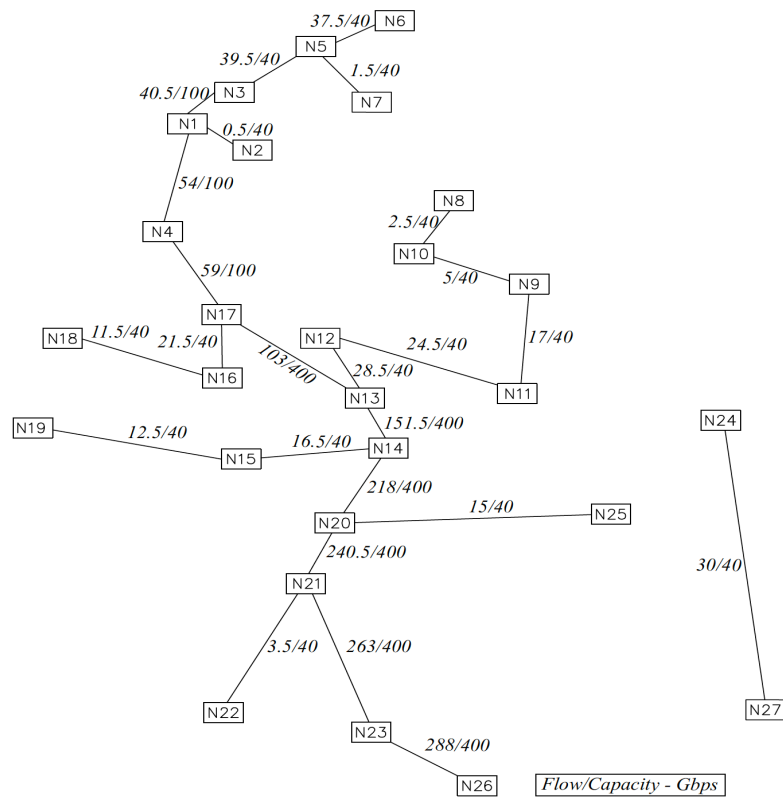


Figura 7.2: Rede solução do método exato

A rede solução priorizou o escoamento das demandas pelo nó N26. No resultado obtido dos 50 links que foram candidatos 25 foram instalados, sendo 16 links de 40 Gbps, 3 links de 100 Gbps e 6 links de 400 Gbps. A capacidade utilizada da rede solução é de 50,30% [112].

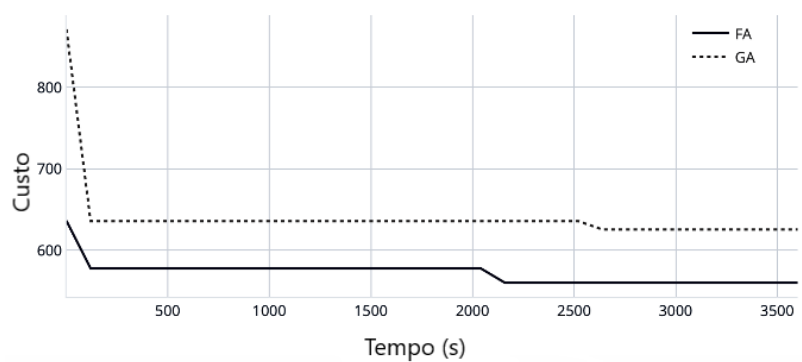
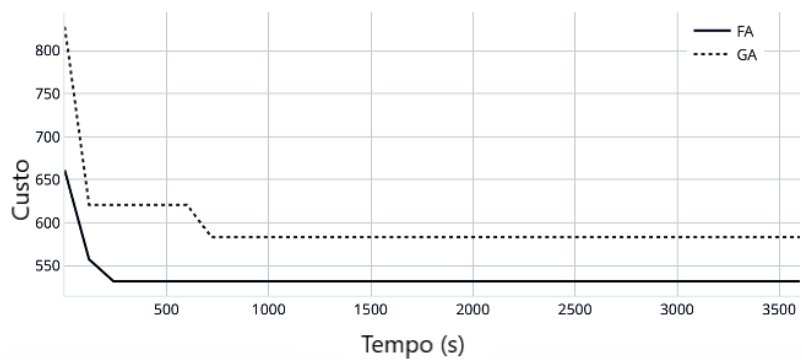
### 7.3 Estudo de Caso 02: Rede OTN/WDM com os Modelo C5-2 (ILP-GA) e C5-3 (ILP-FA)

Esse estudo apresenta o comparativo dos resultados da Seção 7.1.2 (método exato) com os modelos: Modelo C5-2 ILP-GA e Modelo C5-3 ILP-FA. A Tabela 7.4 apresenta o comparativo de desempenho entre o algoritmo genético e o algoritmo *firefly* com a alteração do número dos caminhos candidatos. O *Gap* representa o quantos por cento a solução está acima do valor ótimo. O critério de parada foi o tempo de execução de 3600 segundos. Para o algoritmo genético foram utilizados 100 indivíduos de população, probabilidade de *crossover* de 0,6 e probabilidade de mutação de 0,10. No *firefly* foram utilizados 100 vaga-lumes de população, o valor de  $\beta$  foi de 1,  $\alpha$  com valor de 8 e o coeficiente de absorção de luz ( $\gamma$ ) de 0,10 [26].

Tabela 7.4: Comparativo dos métodos bio-inspirados

Número de Caminhos Candidatos	Método	Custo	Método Exato (Custo)	Gap
10	GA	625,20	559,63	11,72%
	FA	559,63		00,00%
12	GA	617,46	537,75	14,82%
	FA	555,53		03,30%
14	GA	582,94	531,67	09,64%
	FA	531,67		00,00%
16	GA	622,84	530,96	17,30%
	FA	548,73		03,35%
18	GA	637,53	530,96	20,07%
	FA	549,44		03,48%
20	GA	622,68	530,96	17,27%
	FA	551,81		03,92%

As Figuras 7.3, 7.4 e 7.5 apresentam o comparativo para cada caso da Tabela 7.4 (variação do número de caminhos candidatos) do custo em função do tempo de execução.

Figura 7.3: Convergência dos algoritmos para  $k=10$ Figura 7.4: Convergência dos algoritmos para  $k=14$

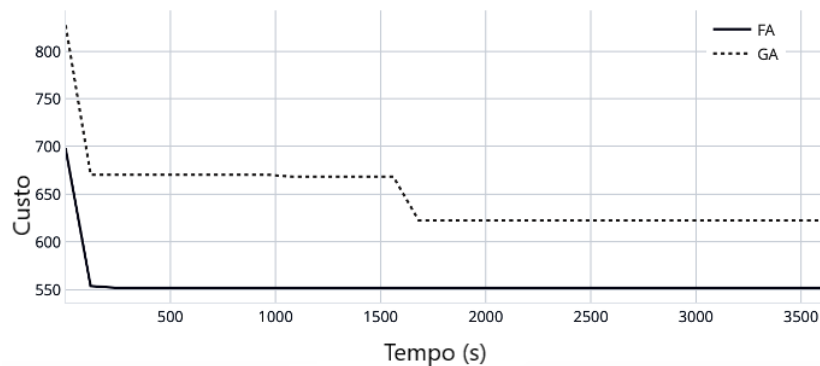


Figura 7.5: Convergência dos algoritmos para  $k=20$

O algoritmo *firefly* mostrou-se mais eficaz em todos os casos, com destaque para 10 e 14 caminhos candidatos, onde *firefly* obteve o mesmo valor do método exato (*branch-and-bound*). O algoritmo *firefly* na maioria dos casos chega à convergência antes de 500 segundos. A melhor solução do algoritmo genético foi para 14 caminhos candidatos, com 09,64% maior que o valor ótimo. Os resultados do algoritmo genético ficaram em média 15,14% maiores que o método exato, já o *firefly* com 2,34%.

A Tabela 7.5 apresenta outro comparativo entre os métodos do algoritmo genético e do *firefly*, onde que para cada um foram realizadas 10 réplicas (cada algoritmo foi executado 10 vezes) e o critério de parada é o número de gerações (50).

Tabela 7.5: Comparativo entre GA e FA

Método	GA		FA	
	Réplica	Custo	Tempo (s)	Custo
1	639,74	34	559,64	143
2	620,31	33	577,41	145
3	629,79	38	579,23	139
4	616,12	31	577,41	141
5	627,81	31	579,07	141
6	637,21	32	578,52	134
7	646,61	30	578,52	138
8	644,48	36	578,12	141
9	634,69	35	579,23	144
10	654,44	29	577,41	148

Para as demandas previstas,  $k=10$  caminhos foram gerados (5 para cada destino). Este valor de  $k$  permite uma boa variedade de combinações de caminhos a serem analisados mantendo o tempo em um valor relativamente baixo processamento (como observado na Tabela 7.3)

Os dois métodos possuem valores baixos em termos de tempo de processamento cada réplica, destacando o algoritmo genético com valores menores. Mas em relação ao custo de implantação da rede o algoritmo *firefly* mostrou-se mais eficaz em todas as réplicas realizadas, destacando a réplica 1 que obteve o mesmo valor do método exato. A Figura 7.6 apresenta o comparativo dos custos desses métodos em relação ao número de gerações (com  $k=10$  caminhos gerados). Pode-se observar que ambos métodos nas primeiras gerações apresenta uma decaída elevada, mas o *firefly* possui melhores valores.

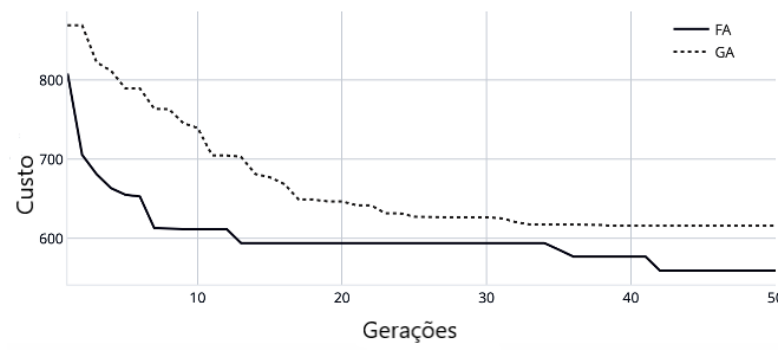


Figura 7.6: Comparativo de convergência para  $k=10$

A Tabela 7.6 apresenta o comparativo entre os três métodos para 10 caminhos candidatos assumindo como critério de parada o número de gerações.

Tabela 7.6: Comparativo entre os métodos para 10 caminhos

Método	Exato	GA	FA
<b>Melhor Custo</b>	559,64	616,12	559,64
<b>Pior Custo</b>	-	654,44	579,23
<b>Custo Médio</b>	-	635,08	576,46
<b>Gap Médio</b>	-	13,48%	3,00%
<b>Tempo de Execução (s)</b>	2460	329	1414

O tempo de execução apresentado para os algoritmos genético e *firefly* é a soma das 10 réplicas realizadas. O desempenho em termos de tempo computacional necessário para encontrar a solução com o método exato apresentou valor elevado quando comparado com os outros dois métodos. O algoritmo genético apesar de ter ótimos resultados em termos de tempo a solução apresentou maior valor de implantação da rede (aproximadamente 10% maior que a solução ótima).

O algoritmo *firefly* destaca-se pela sua eficiência pois chegou no mesmo valor ótimo do método exato com um tempo de execução menor (cerca de 42,50%). A topologia da rede com solução ótima (método exato e *firefly*), para  $k=10$ , obtida com as simulações pode ser verificada na Figura 7.7.

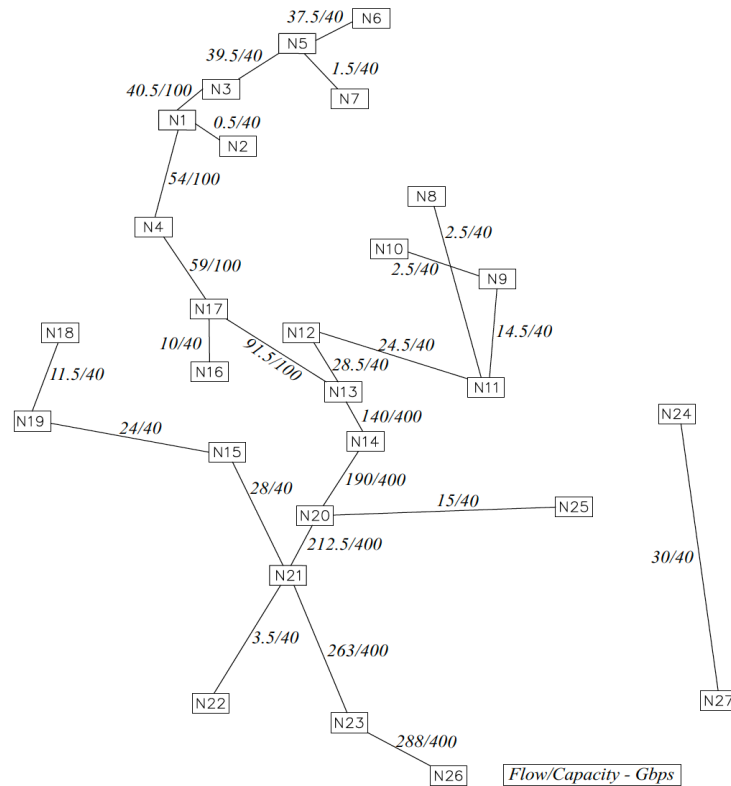


Figura 7.7: Rede solução para  $k=10$

A rede solução também priorizou o escoamento das demandas pelo nó N26. No resultado obtido dos 50 links que foram candidatos 25 foram instalados, sendo 16 links de 40 Gbps, 3 links de 100 Gbps e 6 links de 400 Gbps. A rede solução para  $k=10$  (Figura 7.7) é 5,40% mais cara que a rede solução para  $k=16$ , 18 e 20 (Figura 7.2). Como os sistemas OTN/WDM alocados são os mesmos nas duas redes, a diferença orçamentária acontece devido ao custo de rede e/ou de regeneradores devido às mudanças no atendimento dos nós de demanda 8, 15 e 18. Embora as duas redes possuam a mesma carga instalada (Tabela 7.3) a rede da Figura 7.7 apresenta uma maior folga que aquela da Figura 7.2 [113].

## 7.4 Estudo de Caso 03: Rede OTN/WDM com Modelo C5-2 (ILP-GA), C5-3 (ILP-FA) e C5-4 (ILP-HFA)

Esse estudo apresenta outro comparativo dos resultados da Seção 7.1.1 (método exato) com os modelos: Modelo C5-2 GA, Modelo C5-3 FA e algoritmo híbrido *Firefly*-GA (Seção 3.6). As tabelas 7.7 e 7.8 descrevem as cinco configurações dos algoritmos FA, HFA e GA usados para avaliar a rede. Os parâmetros  $\beta$  e  $\gamma$  do algoritmo do vaga-lume são fixados em  $\beta=1$  e  $\gamma=0,1$ . Essas configurações foram escolhidas com base no trabalho do Yang [26], com o objetivo de avaliar o desempenho da metodologia, privilegiando alguns de seus parâmetros, além do objetivo principal de dimensionar a rede a um custo mínimo.

Tabela 7.7: Configurações do FA e HFA

Configurações	Parâmetros		
	<i>Fireflies</i>	Gerações	$\alpha$
1	100	50	4
2	100	50	8
3	100	100	8
4	200	100	4
5	500	500	8

Para cada valor de  $k$  foram realizadas 10 repetições (cada algoritmo foi executado 10 vezes). O tempo de execução apresentado é a soma das 10 réplicas feitas. O critério de parada é o número de gerações.

Tabela 7.8: Configurações GA

Configurações	Parâmetros			
	População	Gerações	Prob. Crossover	Prob. Mutação
1	100	50	0,6	0,05
2	100	50	0,9	0,10
3	100	100	0,9	0,10
4	200	100	0,6	0,05
5	500	500	0,9	0,10

A Tabela 7.9 apresenta a comparação de desempenho, trazendo as melhores soluções dos métodos exatos de GA, FA e HFA. *Gap* representa quantos por cento a solução está acima do valor ideal encontrado pelo método exato. *Config.* apresenta em quais configurações os valores mais baixos de custo de implantação foram encontrados.

O algoritmo HFA provou ser eficaz em todos os casos, pois suas soluções atingiram o mesmo valor que o método exato (*branch-and-bound*), enquanto o FA atingiu o valor em apenas 2

casos ( $k=14$  e  $k=20$ ). O HFA, na configuração 5 (Tabela 7.7), atingiu o valor ótimo em todos os cenários avaliados.

Tabela 7.9: Comparativo entre os algoritmos

Número de Caminhos Candidatos ( $k$ )	Método Exato (Custo)	Método	Custo	Gap	Config.
10	559,63	GA	578,12	03,30%	3 a 5
		FA	577,41	03,17%	2 a 5
		HFA	559,63	00,00%	4 e 5
12	537,75	GA	556,63	03,51%	4 e 5
		FA	538,78	00,19%	5
		HFA	537,75	00,00%	3, 5
14	531,67	GA	549,44	03,34%	5
		FA	531,67	00,00%	5
		HFA	531,67	00,00%	5
16	530,96	GA	548,73	03,34%	4 e 5
		FA	532,85	00,35%	4 e 5
		HFA	530,96	00,00%	4 e 5
18	530,96	GA	555,53	04,62%	3 a 5
		FA	538,07	01,34%	5
		HFA	530,96	00,00%	5
20	530,96	GA	548,50	03,30%	5
		FA	530,96	00,00%	3 e 5
		HFA	530,96	00,00%	4 e 5

O desempenho em termos de tempo computacional (Tabela 7.10) necessário para encontrar a solução com o método exato foi elevado, sendo fortemente influenciado pelo valor de  $k$ . Com base em todos os valores de  $k$  e na configuração 5 dos algoritmos bio-inspirados, o algoritmo genético, apesar de apresentar excelentes resultados em termos de tempo, apresentou os maiores valores de custo. O HFA apresentou valores de tempo de processamento ligeiramente maiores que o FA, mas obteve melhores resultados de custo (Tabela 7.9).

Tabela 7.10: Comparativo do tempo de processamento

Número de Caminhos Candidatos ( $k$ )	Tempo de Processamento (s)			
	Método Exato	GA	FA	HFA
10	2460	7060	29651	29874
12	56077	7342	28746	29965
14	35566	8608	30987	31675
16	64376	8923	32287	33934
18	290739	10006	33178	34365
20	318140	9466	35971	37537

As Figuras 7.8, 7.9 e 7.10 mostram o comparativo para os casos de  $k=10$ ,  $k=14$  e  $k=20$  da Tabela 7.9, para os três métodos GA, FA e HFA, na configuração 5, do custo em função do número de gerações.

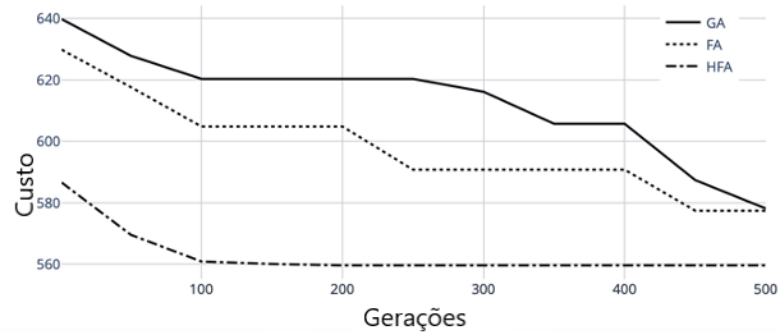


Figura 7.8: Convergência dos métodos  $k=10$

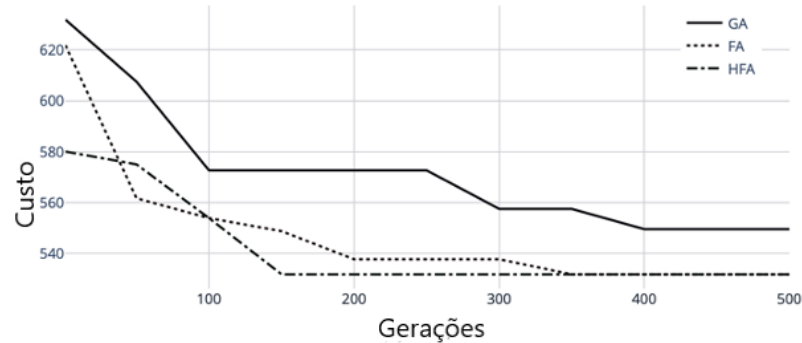


Figura 7.9: Convergência dos métodos  $k=14$

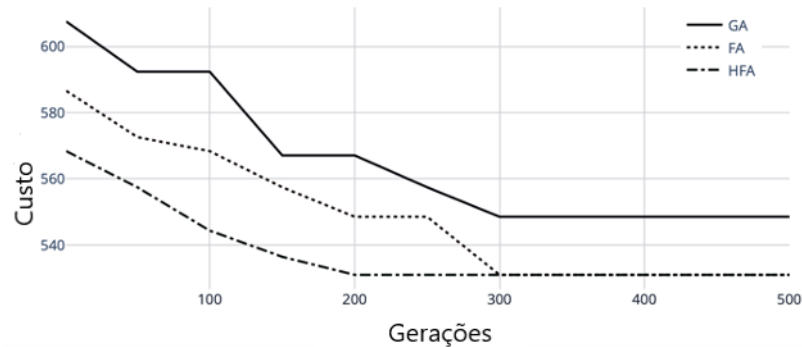


Figura 7.10: Convergência dos métodos  $k=20$

Vale ressaltar que nos três casos, o aumento do esforço computacional (em média 3,7%) causado pelo método de melhoria da solução apresentado no algoritmo HFA na Seção 3.6 (*Passo06*) é compensado pela convergência mais rápida à solução ótima.

A Tabela 7.11 apresenta a comparação entre o desempenho dos métodos, considerando a mudança do número de gerações e assumindo como critério de parada o tempo de execução de 3600 segundos. A configuração usada para os algoritmos bio-inspirados é a *Config. 5* (Tabela 7.7 e 7.8).

Tabela 7.11: Comparativo de custo entre os métodos

Número de Caminhos Candidatos ( $k$ )	Custo			
	Método Exato	GA	FA	HFA
10	559,63	625,20	559,63	559,63
12	631,37	617,46	555,53	537,75
14	620,54	582,94	531,67	531,67
16	622,75	622,83	548,73	538,79
18	566,43	637,53	549,44	549,44
20	553,63	622,91	551,81	548,50

Considerando todos os valores de  $k$ , o HFA forneceu os melhores valores de custo, com média de 544,39, seguido pelo método de FA, com média de 549,44. O método exato alcançou uma média de 592,34 e o GA alcançou os mais altos custos de implementação, com uma média de 618,10. Vale ressaltar que o método exato busca a melhor solução em um espaço menos adequado do que o considerado pelo HFA, sendo menos eficiente pelo tempo disponível de 3600 segundos. Considerando os critérios de parada dos algoritmos, o número de geração e o tempo de processamento (3600 segundos), o desempenho do HFA pode ser destacado uma vez que forneceu os menores valores de custo em todos os casos.

Tabela 7.12: Comparativo entre os métodos

$k=10$				
Método	Melhor Custo	Pior Custo	Custo Médio	Gap Médio
Exato	559,63	-	-	-
GA	578,12	629,79	598,35	06,91%
FA	577,41	578,12	577,49	03,19%
HFA	559,63	577,41	568,96	01,67%
$k=14$				
Exato	531,67	-	-	-
GA	549,44	616,12	566,59	06,56%
FA	531,67	556,63	545,65	02,63%
HFA	531,67	549,44	543,52	02,22%
$k=20$				
Exato	530,96	-	-	-
GA	548,50	576,15	563,07	06,05%
FA	530,96	568,33	550,47	03,67%
HFA	530,96	568,33	543,44	02,35%

A variabilidade entre as soluções obtidas por cada método, levando em consideração todas as configurações, pode ser vista na Tabela 7.12. São Listados: Menor custo (melhor solução), pior custo, custo médio e *gap* médio. Em todos os cenários, o método híbrido HFA proposto neste trabalho obteve os melhores resultados também em termos de pouca variabilidade entre as soluções obtidas.

Para verificar e comparar melhor o desempenho dos métodos, também foi considerada uma rede OTN/DWDM menor, mostrada na Figura 7.11 (Rede 2). Esta rede está contida no repositório SNDlib [18]. A rede é composta por 11 nós, 34 *links* e 11 demandas que podem ser drenadas pelos nós de destino (*TN*) N2 ou N8, com a possibilidade de alocar a capacidade dos sistemas de transmissão de 40, 100 ou 400 *Gbps*. A Figura 7.11 mostra a topologia da rede, incluindo possíveis *links* a serem alocados e dimensionados.

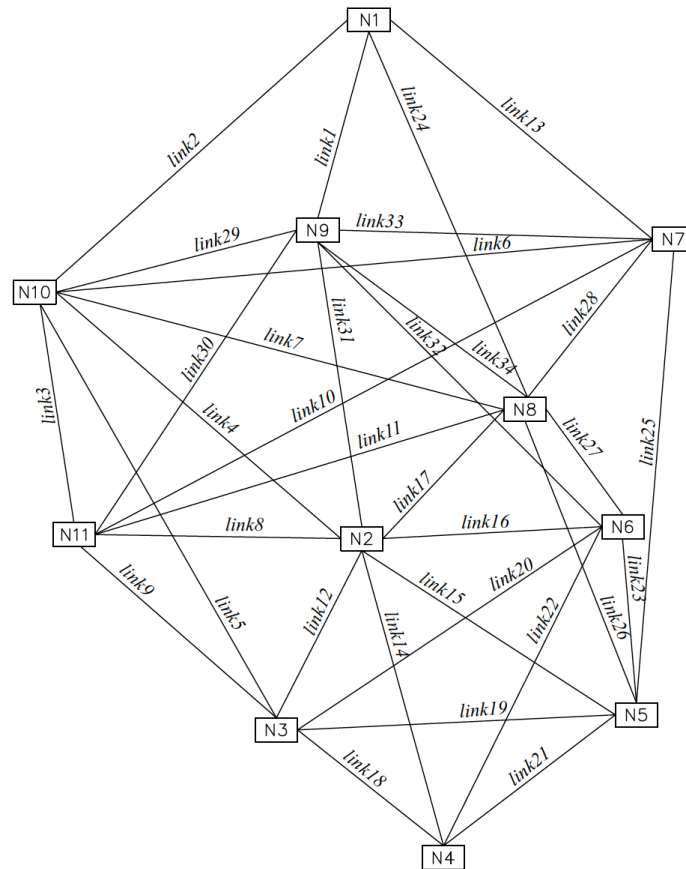


Figura 7.11: Rede backbone WDM

A Tabela 7.13 apresenta as demandas geradas aleatoriamente na faixa de  $[0,5 \text{ a } 50] \text{ Gbps}$ . A Tabela 7.14 apresenta a comparação de desempenho, trazendo as melhores soluções do método exato, GA, FA e HFA para a rede da Figura 7.11. As configurações usadas nos algoritmos de inspiração biológica são as da Tabela 7.7 e 7.8.

Em termos de desempenho da resposta, o algoritmo HFA também se mostrou eficaz, pois suas soluções igualaram ao método exato em 4 casos ( $k=14$  a  $k=20$  - *Config.* 3 e 5), enquanto o FA atingiu o valor em apenas 2 casos ( $k=12$  e  $k=18$  - *Config.* 3 e 5).

Tabela 7.13: Demandas da Rede 2

<b>Demanda/Nó de Origem</b>	<b>(Gbps)</b>
dem1/N1	19
dem2/N2	42
dem3/N3	25
dem4/N4	46
dem5/N5	21
dem6/N6	33
dem7/N7	36
dem8/N8	08
dem9/N9	44
dem10/N10	06
dem11/N11	47

Vale ressaltar que, nas configurações 3 e 5, o HFA alcançou a solução ideal. Na rede grande, a solução ideal foi alcançada apenas para a configuração 5. Esses resultados mostram que, para redes menores, o HFA não precisa ter seus parâmetros excessivamente ajustados para obter uma boa solução.

Tabela 7.14: Comparativo entre os algoritmos – Rede 2

<b>Número de Caminhos Candidatos (<i>k</i>)</b>	<b>Método Exato (Custo)</b>	<b>Método</b>	<b>Custo</b>	<b>Gap</b>	<b>Config.</b>
<b>10</b>	98,44	GA	102,93	04,56%	4 e 5
		FA	102,93	04,56%	1 a 5
		HFA	102,93	04,56%	1 a 5
<b>12</b>	98,44	GA	102,93	04,56%	3 a 5
		FA	98,44	00,00%	3 e 5
		HFA	102,93	04,56%	1 a 5
<b>14</b>	98,44	GA	102,93	04,56%	1 a 5
		FA	102,93	04,56%	1 a 5
		HFA	98,44	00,00%	3 e 5
<b>16</b>	97,24	GA	102,93	05,85%	4 e 5
		FA	98,44	01,23%	3 e 5
		HFA	97,24	00,00%	3 e 5
<b>18</b>	97,24	GA	102,93	05,85%	4 e 5
		FA	97,24	00,00%	3 e 5
		HFA	97,24	00,00%	3 e 5
<b>20</b>	97,24	GA	102,93	05,85%	1 a 5
		FA	98,44	01,23%	3 e 5
		HFA	97,24	00,00%	3 e 5

A Tabela 7.15 mostra a comparação do tempo de processamento entre os métodos exatos, GA, FA e HFA para a rede da Figura 7.11. Os tempos de execução são apresentados em termos do

número de caminhos candidatos ( $k$ ) na Tabela 7.15. As configurações usadas para apresentar os tempos de processamento dos algoritmos bio-inspirados são a 3 e a 5 (Tabela 7.7 e 7.8).

Tabela 7.15: Comparativo do tempo de processamento – Rede 2

$k$	Exato	Tempo de Processamento (s)					
		GA		FA		HFA	
		Config.		Config.		Config.	
		3	5	3	5	3	5
<b>10</b>	04	267	12904	1996	23299	1959	23830
<b>12</b>	08	554	13600	2144	24178	2019	25257
<b>14</b>	12	573	13910	2172	24814	2130	25781
<b>16</b>	14	609	14825	2128	25219	2168	26579
<b>18</b>	20	631	10294	2138	29809	2194	25699
<b>20</b>	28	664	11828	2208	27779	2270	25791

O método exato provou ser mais eficaz do que os outros métodos (GA, FA e HFA) em termos de tempo de processamento para redes menores, pois o espaço de pesquisa do algoritmo é pequeno. Este método (exato) para a maior rede da Figura 7.1, que possui um volume maior de dados, mostrou um tempo de processamento alto (grande espaço de pesquisa). Vale a pena notar que o tempo de processamento do método exato é menos influenciado pelo número de caminhos candidatos quando se considera a rede da Figura 7.11 do que na rede maior porte.

Os parâmetros dos algoritmos bio-inspirados influenciam seu desempenho, principalmente o número de indivíduos e gerações. Isso pode ser visto na Tabela 7.15, porque, mesmo para uma pequena rede, os algoritmos obtiveram um alto valor no tempo de processamento. Isso se deve ao fato de que, embora a rede tenha um volume menor de informações, os algoritmos precisam processar todos os indivíduos até o número de geração estabelecido. Vale destacar que, enquanto se observa uma explosão no tempo computacional para o método exato (de 28 para 318140 segundos), o HFA proposto apresenta um aumento de apenas 45,5% no pior caso, ao realizar os ajustes na configuração 5 e  $k=20$ , nas duas redes.

A variabilidade entre as soluções obtidas por cada método, levando em consideração todas as configurações, pode ser conferida na Tabela 7.16. Em todos os cenários, o método híbrido proposto neste trabalho obteve bons resultados com pouca variabilidade entre as soluções obtidas, para as duas redes avaliadas. Como ocorreu para a rede de grande porte, a convergência do HFA para solução ótima também é rápida para a rede de menor porte.

Tabela 7.16: Comparativo entre os métodos – Rede 2

<i>k=10</i>				
<i>Método</i>	<i>Melhor Custo</i>	<i>Pior Custo</i>	<i>Custo Médio</i>	<i>Gap Médio</i>
Exato	98,44	-	-	-
GA	102,93	113,20	109,09	10,82%
FA	102,93	102,93	102,93	04,56%
HFA	102,93	102,93	102,93	04,56%
<i>k=14</i>				
Exato	98,44	-	-	-
GA	102,93	102,93	102,93	04,56%
FA	102,93	102,93	102,93	04,56%
HFA	98,44	102,93	101,12	02,72%
<i>k=20</i>				
Exato	97,24	-	-	-
GA	102,93	102,93	102,93	05,85%
FA	98,44	102,93	102,38	05,28%
HFA	97,24	98,44	97,96	00,74%

## 7.5 Comentários Finais

Este capítulo apresentou as aplicações dos Modelos C5-1 (ILP), C5-3 (ILP-GA), C5-5 (ILP-FA) e C5-7 (ILP-FA-Híbrido) para redes de transporte ópticas OTN/WDM. A qualidade das soluções e o tempo computacional são influenciados pelo número de caminhos candidatos e também pelos parâmetros dos algoritmos bio-inspirados. O Modelo C5-3 mesmo com os menores tempos de processamento, apresentou as soluções mais onerosas. Já o Modelo C5-5 apresentou bons resultados tanto em termos de solução e tempo computacional. O Modelo C5-7 destaca-se pelos bons resultados, tanto para a rede de grande porte e de pequeno porte.

---

## Capítulo 8. CONCLUSÃO

---

O constante desenvolvimento do mercado de telecomunicações tem obrigado as operadoras do setor a buscarem novas soluções de planejamento de suas redes. Para alcançar os objetivos desejados torna-se conveniente utilizar técnicas de otimização no processo de planejamento das redes, em particular nas redes de transporte ópticas.

À medida que novas tecnologias de rede de transporte óptica se apresentam economicamente viáveis, as mesmas se tornam componentes pelas quais as operadoras dos sistemas de telecomunicações optam como foco no planejamento estratégico, tanto para a implantação da rede quanto da expansão do sistema.

Neste trabalho são apresentados modelos de otimização com foco de aplicação no dimensionamento da infraestrutura de transmissão de redes de transporte óptica. A rede de transporte é vista como um grafo. Seguindo a abordagem arco-caminho, a modelagem é traduzida como um problema de programação linear inteira mista (MILP) e programação linear inteira (ILP), os quais obedecem às restrições de perfil de atendimento de demanda e de capacidade técnica de equipamentos de acordo com as tecnologias avaliadas. Ocasionalmente, exigências de exclusividade na alocação de *links* de transmissão também são restrições que podem ser asseguradas pelos modelos propostos.

A metodologia de planejamento é avaliada com aplicações no dimensionamento da infraestrutura de transmissão de rede de transporte óptica PDH de médio porte, especificada no repositório SNDlib. Uma rede atual e realista em termos de dados disponíveis, utilizando a tecnologia OTN/DWDM, que pode ser classificada como de grande porte, também é estudada com os modelos de otimização desenvolvidos.

Os resultados preliminares alcançados nas simulações computacionais são animadores quanto ao desempenho das ferramentas computacionais desenvolvidas. Considerando o ponto de vista da modelagem, cuja finalidade é auxiliar o planejador ao longo do processo de decisão, verifica-se que a metodologia proposta é capaz de refletir as principais situações encontradas no ambiente de planejamento de redes de transporte ópticas. A flexibilidade quanto a variações nos cenários possíveis de serem contemplados é um dos seus principais atributos, com destaque para a

facilidade de adaptação da modelagem para atender novos requisitos e/ou especificidades de rede e tecnologia a serem avaliadas.

A aplicação do Modelo C4-1 trazendo a comparação com o repositório SNDlib de uma rede PDH, permitiu destacar a importância da geração dos caminhos candidatos no desempenho dos modelos. A incorporação da modelagem *fuzzy* (Modelo C4-4) para a rede PDH proporcionou um estudo com dados impreciso de demanda, possibilitando uma diminuição no tempo de processamento. E a utilização do algoritmo genético (Modelo C4-2) se destacou tanto pela qualidade das soluções obtidas, tanto pelo desempenho em termos de tempo computacional em relação ao resultado presente no repositório SNDlib.

A proposta do ILP aplicado a redes OTN proporcionou resolver problemas com demandas com múltiplos nós de destinos e com os recursos da rede dimensionados de forma dinâmica. A qualidade da solução e o tempo computacional são fortemente influenciados pelo número de caminhos candidatos e pelos parâmetros dos algoritmos bio-inspirados. O algoritmo genético (Modelo C5-2), mesmo com os menores tempos de processamento, apresentou as soluções mais caras. Em relação ao algoritmo híbrido (Modelo C5-4), o mesmo se mostrou ser eficaz em termos de desempenho da resposta, tanto para uma rede de grande e de pequeno porte. Outro destaque é que para ambas as redes (grande e pequena), o HFA proposto forneceu excelentes resultados com pequena variabilidade entre as soluções obtidas. O desempenho do método exato (Modelo C5-1) depende do volume de informações da rede (espaço de busca).

Por fim, não se pretende chegar a um planejamento completamente automatizado, mas sim dispor de modelos matemáticos refinados e capazes de fornecer resultados úteis em termos de custo e dimensionamento de rede otimizados e desempenho computacional. Com as técnicas apresentadas neste trabalho, o papel do planejador é reforçado, sendo possível analisar em detalhe as variantes do problema e estabelecer diretrizes de grande importância para decisões futuras.

## 8.1 Trabalhos Futuros

Para a continuação do trabalho, podem ser realizadas as seguintes metodologias:

i) avaliar a influência dos parâmetros do algoritmo genético e *firefly* na qualidade das soluções obtidas. O objetivo é verificar a sensibilidade das soluções alcançadas conforme os possíveis ajustes do GA, FA e HFA;

ii) verificar a influência do método de atração do algoritmo *firefly* em seu desempenho. A proposta seria confrontar o método aqui utilizado (totalmente atraído), com a atração por vizinhança [114], randômica [115], etc;

iii) aplicar o estudo com a lógica *fuzzy* apresentando ao planejador os valores de custo de implantação de rede para todos os valores do grau de confiança. Ou seja, esse parâmetro não será um dado de entrada dos modelos. Assim o planejador tomará a decisão com base em todos os valores do grau de confiança.

iv) executar a metodologia *fuzzy* na rede OTN/WDM. O intuito é verificar o comportamento da metodologia ao resolver os cenários com dados imprecisos utilizando o algoritmo genético e *firefly*. Pode ser interessante avaliar uma rede OTN/DWDM diferente das estudadas até agora. Um exemplo seria a rede CORONET [24], com 75 nós, 99 *links*, e com matriz de interesse de tráfego de demanda gerada aleatoriamente. Outra rede poderia ser uma rede WDM, com o nome FRANCE, da SNDlib [19], que possui 25 nós, 45 *links* e 300 demandas.

---

## REFERÊNCIAS

---

- [1] A. Kumar e M. Gupta, “A review on activities of fifth generation mobile communication system,” *Alexandria Engineering Journal*, 2017.
- [2] S. Mumtaz, A. Morgado, K. M. S. Huq e J. Rodriguez, “A survey of 5G technologies: Regulatory, standardization and industrial perspectives,” *Digital Communications and Networks*, 2017.
- [3] S. Li, L. Da Xu e S. Zhao, “5G internet of things: A survey,” *Journal of Industrial Information Integration*, 2018.
- [4] P. P. Sahu, *Optical Networks and Components: Fundamentals and Advances*, CRC Press, 2020.
- [5] X. Liu e N. Deng, “Emerging optical communication technologies for 5G,” *Optical Fiber Telecommunications VII*, pp. 751-783, 2020.
- [6] A. Willner, *Optical Fiber Telecommunications*, Academic Press, 2019.
- [7] Q. Wang e G. Ying, “OTN for the Future Transmission Network,” *Symposium on Photonics and Optoelectronics (SOPO)*, 2012.
- [8] I.-T. R. G.709, *Interfaces for the Optical Transport Network (OTN)*, 2012.
- [9] H. Beenish e M. Fahad, “5G - A review on existing technologies,” *International Conference on Computing, Mathematics and Engineering Technologies (iCoMET)*, pp. 1-6, 2019.
- [10] M. DeSousa, B. DeOliveira, M. Dantas, A. Santana e F. Bragança, “Modelagem de um sistema de apoio à decisão para a seleção de serviços de telecomunicações,” *Conferência Ibero-Americana Computação Aplicada, Porto-Portugal*, 2014.
- [11] E. O. Figueirôa, E. A. O. Lima, C. J. Bastos-Filho, J. C. Silva, A. V. Xavier e D. R. Araújo, “A routing algorithm based on fuzzy logics for elastic optical networks,” *IEEE 18th International Conference on High Performance Switching and Routing (HPSR)*, pp. 1-6, 2017.

- [12] F. N. Khan, Q. Fan, C. Lu e A. P. T. Lau, “Machine learning methods for optical communication systems and networks,” *Optical Fiber Telecommunications VII*, pp. 921-978, 2020.
- [13] R. Gu, Z. Yang e Y. Ji, “Machine learning for intelligent optical networks: A comprehensive survey,” *Journal of Network and Computer Applications*, vol. 157, 2020.
- [14] S. Samanta e M. Pal, “Telecommunication system based on fuzzy graphs,” *J Telecommun Sys Manag*, pp. 1-6, 2013.
- [15] L. A. Wolsey e G. L. Nemhauser, *Integer and combinatorial optimization*, John Wiley & Sons, 2014.
- [16] F. Musumeci e e. al., “An overview on application of machine learning techniques in optical networks,” *EEE Communications Surveys & Tutorials*, 2018.
- [17] J. Simmons, *Optical Network Design and Planning*, Springer International Publishing Switzerland, 2014.
- [18] S. Orłowski, R. Wessaly, M. Pióro e A. Tomaszewski, “SNDlib 1.0 - Survivable network design library,” *Networks*, pp. 276-286, 2010.
- [19] SNDlib, “Survivable Network Design library,” <http://sndlib.zib.de>, 2018.
- [20] A. Srivastava, “Flow aware differential delay routing for next-generation Ethernet over SONET/SDH,” *In Proc. IEEE ICC*, p. pp. 140–145, 2006.
- [21] C. Ou, L. Sahasrabudde, K. Zhu, C. Martel e B. Mukherjee, “Survivable virtual concatenation for data over SONET/SDH in optical transport networks,” *IEEE/ACM Trans. Netw.*, vol. 14, n° 1, p. 218–231, 2006.
- [22] S. Ahuja, T. Korkmaz e M. Krunz, “Minimizing the differential delay for virtually concatenated Ethernet over SONET systems,” *In Proc. ICCCN*, p. 205–210, 2004.
- [23] K. D. R. Assis, I. Queiroz, R. Almeida e H. Waldman, “MILP formulation for resource optimization in Spectrum-Sliced Elastic Optical Path Networks,” *Microwave & Optoelectronics Conference (IMOC), SBMO/IEEE MTT-S International*, 2013.
- [24] J. R. Santos, A. Eira e J. Pires, “A Heuristic Algorithm for Designing OTN Over Flexible-Grid DWDM Networks,” *Journal of Communications*, vol. 12, n° 9, 2017.

- 
- [25] A. Eira, J. Santos, J. Pedro e J. Pires, “Multi-objective Design of Survivable Flexible-Grid DWDM Networks,” *J. OPT. COMMUN. NETW*, vol. 6, n° 3, 2014.
- [26] X. S. Yang, *Nature-Inspired Metaheuristic Algorithms*, Luniver Press, 2010.
- [27] D. Din, “Heuristic and Genetic Algorithms for Solving the Virtual Topology Design Problem on Elastic Optical Networks,” *Journal of Information Science & Engineering*, vol. 33, 2017.
- [28] D. Din, “Genetic algorithm for virtual topology design on MLR WDM networks,” *Optical Switching and Networking*, vol. 18, pp. 20-34, 2015.
- [29] S. A. Fernandez, A. A. Juan, J. A. Adrián, J. D. G. Silva e D. R. Terrén, “Metaheuristics in Telecommunication Systems: Network Design, Routing, and Allocation Problems,” *IEEE Systems Journal*, vol. 12, pp. 3948-3957, 2018.
- [30] J. Mata e e. al., “Artificial Intelligence (AI) Methods in Optical Networks: A Comprehensive Survey,” *Optical Switching and Networking*, vol. 28, pp. 43-57, 2018.
- [31] X. S. Yang, S. F. Chien e T. O. Ting, *Bio-inspired Computation in Telecommunications*, Morgan Kaufmann, 2015.
- [32] C. e. a. Papagianni, “Communication Network Design Using Particle Swarm Optimization,” *IEEE International Multiconference on Computer Science and Information Technology*, pp. 915-920, 2008.
- [33] J. Triay e C. Cervello, “An Ant-Based Algorithm for Distributed Routing and Wavelength Assignment in Dynamic Optical Networks,” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 28, pp. 542-552, 2010.
- [34] A. Rubio, M. A. Veja e D. L. González, “An Improved Multiobjective Approach Inspired by the Flashing Behaviour of Fireflies for Traffic Grooming in Optical WDM Networks,” *Applied Soft Computing*, pp. 617- 636,, 2014.
- [35] M. Haruna, M. Jinno e Y. Nishio, “Application of Firefly Algorithm to Optimization of Translucent Elastic Optical Network,” *Proc. of Nonlinear Theory and its Applications Conference*, 2015.

- [36] H. Liu, C. Xiong, Y. Chen, C. Li e D. e Chen, “An optimization method of VON mapping for energy efficiency and routing in elastic optical networks,” *Optical Fiber Technology*, vol. 41, pp. 173-181, 2018.
- [37] R. Goscién, “Two Metaheuristics for Routing and Spectrum Allocation in Cloud-Ready Survivable Elastic Optical Networks,” *Swarm and Evolutionary Computation*, vol. 44, pp. 388-403, 2019.
- [38] R. Goscién, “Artificial Bee Colony for Optimization of Cloud-Ready and Survivable Elastic Optical Networks,” *Computer Communications*, vol. 128, pp. 35-45, 2018.
- [39] A. Rahmani e S. A. MirHassani, “A hybrid Firefly-Genetic Algorithm for the Capacitated Facility Location Problem,” *Information Sciences*, vol. 283, pp. 70-78, 2014.
- [40] A. M. Mohsen e W. Al-Sorori, “A New Hybrid Discrete Firefly Algorithm for Solving the Traveling Salesman Problem,” *Applied Computing and Information Technology*, 2017.
- [41] D. T. Hai, “A bi-objective Integer Linear Programming Model for the Routing and Network Coding Assignment Problem in WDM Optical Networks with Dedicated Protection,” *Computer Communications*, vol. 133, pp. 51-58, 2019.
- [42] M. A. DeSousa, C. M. Carlson e F. H. T. Vieira, “Optimum Allocation of Transmission Technologies for Solving the BTS Interconnection Problem in Cellular Systems,” *Handbook of Research on Artificial Intelligence Techniques and Algorithms*, pp. 152-182, 2015.
- [43] E. Iannone, *Telecommunication networks*, CRC Press, 2016.
- [44] C. Filho e J. A. Bastos, *Sistemas de Comunicações Ópticas*, Escola Politécnica de Pernambuco – UPE, 2010.
- [45] G. Keiser, *Comunicações por Fibras Ópticas-4*, AMGH, 2014.
- [46] Furukawa, “Furukawa Electric Co., Ltd.,” <https://www.furukawatam.com>, 2018.
- [47] Anatel, “Agência Nacional de Telecomunicações - Produtos para Telecomunicações,” <http://www.anatel.gov.br>, 2018.
- [48] E. T. L. Pastor, “Algoritmo de RWA com considerações de sobrevivência baseado em Heurística-Algoritmo Genético para Redes IP/WDM,” *Universidade de Brasília (UnB), Faculdade de Tecnologia (FT), Departamento de Engenharia Elétrica*, 2007.

- [49] R. Bernardo, "OTN: a evolução das redes de transporte," *Cad. CPqD Tecnologia*, vol. 7, nº 2, pp. 75-86, 2011.
- [50] O. Babatunde e S. Mbarouk, "A review of Plesiochronous Digital Hierarchy (PDH) and Synchronous Digital Hierarchy (SDH).," *International Journal of Scientific Research Engineering & Technology (IJSRET)*, vol. www.ijret.org, pp. 677-681, 2014.
- [51] F. Mazda, *Telecommunications engineer's reference book*, Butterworth-Heinemann, 2014.
- [52] R. S. Tessinari, *Integração do Plano de Transporte com os Planos de Controle e de Gerência em Redes OTN: Uma Abordagem Via Simulação.*, Vitória: Universidade Federal do Espírito Santo, 2011.
- [53] A. Gilchrist, "OTN (Optical Transport Networks): G.709 Simplified RG Consulting," 2015.
- [54] G. L. César, "Fundamentos do padrão OTN (Optical Transport Network)," *Tese de Doutorado - USP*, 2014.
- [55] A. Perez, *Implementing IP and Ethernet on the 4G Mobile Network.*, Elsevier, 2017.
- [56] V. Cavalcante e B. O. Monteiro, "Rede de Transporte – OTN-Optical Transport Network," *II SRST – Seminário de Redes e Sistemas de Telecomunicações*, 2015.
- [57] M. S. Bazaraa, J. J. Jarvis e H. D. Sherali, *Linear Programming and Network Flows*, New York: Willey, 2010.
- [58] G. B. Dantzig, *Linear programming and extensions*, Princeton University Press, 1998.
- [59] A. H. Land e A. G. Doig, "An automatic method for solving discrete programming," *Econometrica*, vol. 28, nº 3, pp. 497-520, 1960.
- [60] S. Zions, *Linear and integer programming*, Prentice Hall, 1974.
- [61] S. Bandyopadhyay, *Dissemination of Information in Optical Networks, from Technology to Algorithms*, Springer, 2007.
- [62] E. Oki, *Linear Programming and Algorithms for Communication Networks: A Practical Guide to Network Design, Control, and Management*, CRC Press, Taylor & Francis Group, 2016.
- [63] S. Y. M. & V. P. Pagadrai, "A Delay Based MILP for Network Planning in Optical Networks," *Procedia Computer Science*, vol. 20, pp. 427-432, 2013.

- [64] A. N. Khan, "Routing and dimensioning in optical WDM networks for dynamic traffic using post-optimization approach.," *Optical Fiber Technology*, vol. 40, pp. 76-81, 2018.
- [65] P. Saengudomlert, "Power-aware logical topology selection for IP-over-WDM backbone networks based on per-lightpath power consumption model.," *In Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON)*, pp. 1-5, 2014.
- [66] M. Pióro e D. Medhi, *Routing, flow, and capacity design in communication and computer networks*, Elsevier, 2004.
- [67] E. Martins, "An algorithm for ranking optimal paths," [www.mat.uc.pt/~marta/Publicacoes/rank\\_optimal.ps.gz](http://www.mat.uc.pt/~marta/Publicacoes/rank_optimal.ps.gz), 2017.
- [68] J. Y. Yen, "Finding the K Shortest Loopless Paths in a Network," *Management Science*, vol. 17, n° 11, p. 712–716, 1971.
- [69] D. B. A. Teixeira, C. T. Batista, A. J. F. Cardoso e J. D. S. Araújo, "A Genetic Algorithm Approach for Static Routing and Wavelength Assignment in All-Optical WDM Networks," *In Portuguese Conference on Artificial Intelligence*, pp. 421-432, 2017.
- [70] W. Pedrycz e F. Gomide, *An Introduction to Fuzzy Sets: Analysis and Design*, Cambridge, MA: MIT Press, 1998.
- [71] R. R. Yager e L. A. Zadeh, *An introduction to fuzzy logic applications in intelligent systems*, Springer Science & Business Media, 2012.
- [72] D. Driankov e R. Palm, *Advances in fuzzy control*, Physica., 2013.
- [73] G. Bortolan e R. Degani., "A Review of Some Methods for Ranking Fuzzy Subsets," *Fuzzy Sets and Systems*, n° 15, pp. 1-19, 1985.
- [74] D. Peidro, J. Mula, M. Jiménez e M. Mar Botella, "A fuzzy linear programming based approach for tactical supply chain planning in an uncertainty environment," *European Journal of Operational Research*, pp. 65-80, 2010.
- [75] D. Madronero, J. Mula e M. Jiménez, "A modified approach based on ranking fuzzy numbers for fuzzy integer programming with equality constraints," *6th International Conference on Industrial Engineering and Industrial Management*, pp. 375-382, 2012.

- [76] A. S. & A. N. Sudha, "Solving a Interval Fuzzy Linear Programming Problem using Alpha-Cut Operation," *International Journal of Computer Applications*, 2015.
- [77] A. Baykasoğlu e K. Subulan, "An analysis of fully fuzzy linear programming with fuzzy decision variables through logistics network design problem," *Knowledge-Based Systems*, n° 90, pp. 165-184, 2015.
- [78] A. Budnitzki, "Linear optimization with fuzzy variable over fuzzy polytope," *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, n° 29, pp. 499-507, 2015.
- [79] J. H. Holland, *Adaptation in Natural and Artificial Systems*, MIT Press, 1975.
- [80] J. André, S. Auray, J. Brac, D. De Wolf, G. Maisonnier, M.-M. Ould-Sidi e A. Simonnet, "Design and dimensioning of hydrogen transmission pipeline networks," *European Journal of Operational Research*, n° 229, pp. 239-251, 2013.
- [81] A. Alshamsi e A. Diabat, "A Genetic Algorithm for Reverse Logistics network design: A case study from the GCC," *Journal of Cleaner Production*, vol. 151, pp. 652-669, 2017.
- [82] R. C. Peralta, A. Forghani e H. Fayad, "Multiobjective genetic algorithm conjunctive use optimization for production, cost, and energy with dynamic return flow," *Journal of Hydrology*, n° 511, pp. 776-785, 2014.
- [83] R. Mansouri, H. Torabi, M. Hoseini e H. Morshedzadeh, "Optimization of the water distribution networks with differential evolution (DE) and mixed integer linear programming (MILP)," *Journal of Water Resource and Protection*, n° 715, 2015.
- [84] E. Campos, V. H. Cunha, M. J. P. Dantas, L. C. Guimarães, C. A. Lima e B. Q. DeOliveira, "Network Design Genetic Algorithm (NDGA) Aplicado em Redes de Telecomunicações," *4ª Conferência Ibero-Americana Computação Aplicada - Lisboa, Portugal*, 2016.
- [85] P. K. Tripathy, R. K. Dash e C. R. Tripathy, "A genetic algorithm based approach for topological optimization of interconnection networks," *Procedia Technology*, n° 6, pp. 196-205, 2012.
- [86] A. Baumgartner, V. S. Reddy e T. Bauschert, "Combined Virtual Mobile Core Network Function Placement and Topology Optimization with Latency Bounds," *IEEE Communication Networks*, pp. 97-102, 2015.

- [87] J. T. M. Banov, “Abordagem Evolutiva para o Planejamento Multi-Período da Expansão da Rede de Acesso aos Serviços de Telecomunicações,” *Universidade de Campinas (UNICAMP), Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação (FEEC), Departamento de Engenharia de Sistemas (DENSIS)*, 2005.
- [88] R. Linden, *Algoritmos Genéticos*, Rio de Janeiro: Ciência Moderna Ltda., 2012.
- [89] A. F. Pinho, J. A. B. Montevechi, F. A. S. Marins e R. C. Miranda, “Algoritmos Genéticos: Fundamentos e Aplicações,” em *Meta-Heurísticas em Pesquisa Operacional*, Omnipax, 2013, pp. 21-32.
- [90] B. D. A. Prata, “A Hybrid Genetic Algorithm for the Vehicle and Crew Scheduling in Mass Transit Systems,” *EEE Latin America Transactions*, vol. 13, nº 9, pp. 3020-3025, 2015.
- [91] A. Konak, D. W. Coit e A. E. Smith, “Multi-objective optimization using genetic algorithms: A tutorial,” *Reliability Engineering & System Safety*, pp. 992-1007, 2006.
- [92] D. E. Goldberg, “Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning,” *Addison-Wesley Publishing Company*, 1989.
- [93] C. Hicks, “A Genetic Algorithm tool for optimising cellular or functional layouts in the capital goods industry,” *International Journal of Production Economics*, pp. 598-614, 2006.
- [94] X. S. Yang, *Cuckoo Search and Firefly Algorithm: Theory and Applications*, Springer, 2013.
- [95] X. S. Yang e X. He, “Firefly algorithm: Recent Advances and Applications,” *International Journal of Swarm Intelligence*, vol. 1, pp. 36-50, 2013.
- [96] W. T. Lunardi e V. Holger, “Comparative study of genetic and discrete firefly algorithm for combinatorial optimization,” *Proceedings of the 33rd Annual ACM Symposium on Applied Computing*, 2018.
- [97] G. K. Jati e R. Manurung, “Discrete Firefly Algorithm for Traveling Salesman Problem: A new movement scheme,” *Swarm Intelligence and Bio-Inspired Computation*, pp. 295-312, 2013.
- [98] X. S. Yang e X. He, *Applications of Nature-Inspired Algorithms, Mathematical Foundations of Nature-Inspired Algorithms*, Springer, 2019.

- [99] S. K. Das, T. Mandal e S. A. Edalatpanah, “A mathematical model for solving fully fuzzy linear programming problem with trapezoidal fuzzy numbers,” *Applied intelligence*, vol. 3, n° 46, pp. 509-519, 2017.
- [100] H. Nasserri, H. Zavieh e S. M. Mirmohseni, “A Generalized Model for Fuzzy Linear Programs with Trapezoidal Fuzzy Numbers,” *Journal of Applied Research on Industrial Engineering*, vol. 1, n° 4, pp. 24-38, 2017.
- [101] I. B. Aydilek, “A hybrid firefly and particle swarm optimization algorithm for computationally expensive numerical problems,” *Applied Soft Computing*, vol. 66, pp. 232-249, 2018.
- [102] L. Zhang, L. Liu, X. S. Yang e Y. Dai, “A novel hybrid firefly algorithm for global optimization,” *PloS one*, vol. 11, n° 9, 2016.
- [103] W. Pei, G. Huayu, Z. Zheqi e L. Meibo, “A Novel Hybrid Firefly Algorithm for Global Optimization,” *IEEE 4th International Conference on Computer and Communication Systems (ICCCS)*, pp. 164-168, 2019.
- [104] A. M. Altabeeb, A. M. Mohsen e A. Ghallab, “An improved hybrid firefly algorithm for capacitated vehicle routing problem,” *Applied Soft Computing*, vol. 84, 2019.
- [105] F. J. Rodriguez, C. Garcia e M. Lozano, “Hybrid Metaheuristics Based on Evolutionary Algorithms and Simulated Annealing: Taxonomy, Comparison, and Synergy Test,” *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2012.
- [106] I. Rodríguez-Martín, J. J. Salazar-González e H. Yaman, “Hierarchical Survivable Network Design Problems,” *Electronic Notes in Discrete Mathematics*, vol. 52, pp. 229-236, 2016.
- [107] A. Baumgartner, T. Bauschert, A. M. Koster e V. S. Reddy, “Optimisation Models for Robust and Survivable Network Slice Design: A Comparative Analysis,” *IEEE Global Communications Conference*, pp. 1-7, 2017.
- [108] M. Silva, M. Poss e N. Maculan, “k-Adaptive routing for the robust network loading problem,” *Electronic Notes in Discrete Mathematics*, vol. 64, pp. 95-104, 2018.
- [109] B. Q. DeOliveira, V. H. Cunha, L. C. Guimarães, H. V. S. T. Junior, H. V. S. T. Vieira e M. A. DeSousa, “Sistema de Apoio á Decisão para o Planejamento Otimizado de Redes de Transporte Ópticas,” *XVI Conferência de Estudos em Engenharia Elétrica*, 2018.

- [110] B. Q. DeOliveira, V. H. Cunha, L. C. Guimarães, H. V. S. T. Junior e H. V. S. T. Vieira, “Aplicação de um Modelo de Otimização MILP-Fuzzy para o Dimensionamento de Redes de Transporte Ópticas,” *XXXVIII Encontro Nacional de Engenharia de Produção*, 2018.
- [111] B. Q. DeOliveira, V. H. Cunha, L. C. Guimarães, H. V. S. T. Junior, H. V. S. T. Vieira e M. A. DeSousa, “Planejamento Otimizado de Redes de Transporte Ópticas Utilizando Técnica de Inteligência Artificial,” *Escola Regional de Informática de Goiás (ERI-GO)*, 2019.
- [112] B. Q. DeOliveira, V. H. Cunha, L. C. Guimarães, H. V. S. T. Junior, H. V. S. T. Vieira e M. A. DeSousa, “Modelo de Programação Linear Inteira Aplicado ao Planejamento de Redes de Transporte OTN,” *15º Congresso de Pesquisa, Ensino e Extensão (Conpeex)*, 2018..
- [113] B. Q. DeOliveira, M. DeSousa e F. H. T. Vieira, “Firefly Algorithm Based Optimization Model for Planning of Optical Transport Networks,” *Advances in Electrical and Computer Engineering*, vol. 20, pp. 55-64, 2020.
- [114] H. e. a. Wang, “Firefly algorithm with neighborhood attraction,” *Information Sciences*, vol. 382, pp. 374-387, 2017.
- [115] H. Wang, W. Wang, H. Sun e S. Rahnamayan, “Firefly algorithm with random attraction,” *International Journal of Bio-Inspired Computation*, vol. 8, pp. 33-41, 2016.

---

## ANEXO I

---

É listado a seguir a tabela de custo de cada *link* (30xE1, 480xE1 e 1920xE1) que pode ser escolhido para cada um dos 34 *links* da topologia de rede da abordagem arco-caminho. Os valores apresentados já apresentam o valor médio de cada parâmetro de custo.

<i>Link</i>	Nó de Origem	Nó de Destino	Custo <sup>1</sup> (\$) – Valor Médio		
			30xE1	480xE1	1920xE1
<i>L01</i>	N1	N9	88.933	691.901	1.625.091
<i>L02</i>	N1	N10	149.283	988.231	2.498.805
<i>L03</i>	N10	N11	59.431	530.267	1.162.431
<i>L04</i>	N10	N2	106.353	781.681	1.886.283
<i>L05</i>	N10	N3	129.408	892.606	2.215.230
<i>L06</i>	N10	N7	185.588	1.162.906	3.016.802
<i>L07</i>	N10	N8	164.388	1.060.906	2.714.322
<i>L08</i>	N11	N2	94.297	721.289	1.709.211
<i>L09</i>	N11	N3	114.038	818.656	1.995.932
<i>L10</i>	N11	N7	190.093	1.184.581	3.081.079
<i>L11</i>	N11	N8	164.918	1.063.456	2.721.884
<i>L12</i>	N2	N3	84.016	664.962	1.547.981
<i>L13</i>	N1	N7	121.988	856.906	2.109.362
<i>L14</i>	N2	N4	107.148	785.506	1.897.626
<i>L15</i>	N2	N5	139.743	942.331	2.362.689
<i>L16</i>	N2	N6	113.773	817.381	1.992.151
<i>L17</i>	N2	N8	136.828	928.306	2.321.098
<i>L18</i>	N3	N4	70.159	589.043	1.330.671
<i>L19</i>	N3	N5	124.638	869.656	2.147.172
<i>L20</i>	N3	N6	112.978	813.556	1.980.808
<i>L21</i>	N4	N5	103.438	767.656	1.844.692
<i>L22</i>	N4	N6	102.643	763.831	1.833.349
<i>L23</i>	N5	N6	91.168	704.146	1.660.141
<i>L24</i>	N1	N8	132.588	907.906	2.260.602
<i>L25</i>	N5	N7	187.973	1.174.381	3.050.831
<i>L26</i>	N5	N8	151.933	1.000.981	2.536.615
<i>L27</i>	N6	N8	119.603	845.431	2.075.333
<i>L28</i>	N7	N8	93.403	716.391	1.695.191
<i>L29</i>	N9	N10	121.193	853.081	2.098.019
<i>L30</i>	N9	N1	130.203	896.431	2.226.573
<i>L31</i>	N9	N2	124.638	869.656	2.147.172
<i>L32</i>	N9	N6	150.343	993.331	2.513.929
<i>L33</i>	N9	N7	125.698	874.756	2.162.296
<i>L34</i>	N9	N8	117.218	833.956	2.041.304

(1) Dados fornecidos por um operador de rede, presente na biblioteca SNDlib.