

PONTÍFICA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE GOIÁS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO STRICTO SENSU
EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO E SISTEMAS

**MODELOS DE OTIMIZAÇÃO PLIM-*FUZZY* PARA O
DIMENSIONAMENTO DE REDE E SELEÇÃO DE SERVIÇOS EM
TELECOMUNICAÇÕES**

BRUNO QUIRINO DE OLIVEIRA

MARÇO

2015

**MODELOS DE OTIMIZAÇÃO PLIM-FUZZY PARA O
DIMENSIONAMENTO DE REDE E SELEÇÃO DE SERVIÇOS EM
TELECOMUNICAÇÕES**

BRUNO QUIRINO DE OLIVEIRA

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas da Pontifícia Universidade Católica de Goiás, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção e Sistemas.

Orientadora: Profa. Maria José Pereira Dantas, Dra.

Coorientador: Prof. Marcos Antônio de Sousa, Dr.

MARÇO

2015

**MODELOS DE OTIMIZAÇÃO PLIM-FUZZY PARA O
DIMENSIONAMENTO DE REDE E SELEÇÃO DE SERVIÇOS EM
TELECOMUNICAÇÕES**

BRUNO QUIRINO DE OLIVEIRA

Esta dissertação julgada adequada para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção e Sistemas, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas da Pontifícia Universidade Católica de Goiás em Março de 2015.

Prof. Ricardo Luiz Machado, Dr.
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em
Engenharia de Produção e Sistemas

Banca Examinadora:

Profª. Maria José Pereira Dantas, Dra.
Orientadora

Prof. Flávio Henrique Teles Vieira, Dr.
Membro Externo

Prof. Sibélius Lellis Vieira, Dr.
Membro Interno

GOIÂNIA – GOIÁS

MARÇO DE 2015

Dados Internacionais de Catalogação da Publicação (CIP)
(Sistema de Bibliotecas PUC Goiás)

Oliveira, Bruno Quirino de.
O48m Modelos de otimização PLIM-*Fuzzy* para o dimensionamento de rede e seleção de serviços em telecomunicações [manuscrito] / Bruno Quirino de Oliveira – Goiânia, 2015.
80 f. : il. ; 30 cm.

Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica de Goiás, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas, 2015.

“Orientadora: Profa. Dra. Maria José Pereira Dantas”.

Bibliografia.

1. Sistemas de telecomunicação. 2. Programação linear. 3. Lógica difusa. I. Título.

CDU 519.6(043)

Tenho a honra de dedicar este trabalho a minha família, amigos e pessoas que direta, ou indiretamente, puderam de alguma forma contribuir positivamente à execução deste projeto.

AGRADECIMENTOS

Ao supremo criador do universo, por fornecer incessantemente saúde, força e perseverança para fazer com que este projeto saísse do papel e da imaginação, se tornando realidade.

A orientadora professora doutora Maria José Pereira Dantas e ao 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.

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

(François Rabelais)

RESUMO

As telecomunicações experimentam acelerada evolução. O ambiente é muito competitivo e o volume de recursos financeiros envolvidos é significativo. A variedade de tecnologias disponíveis faz da etapa de planejamento do sistema um procedimento não só desejável como necessário, principalmente num ambiente de competitividade. A utilização de metodologias abrangentes e flexíveis que possam auxiliar no processo de decisão, fundamentadas em modelos matemáticos de otimização, parece um caminho inevitável. Este trabalho apresenta modelos matemáticos baseados em pesquisa operacional, programação linear inteira mista (PLIM) e lógica *fuzzy* para ajudar no planejamento estratégico e na tomada de decisões, para o setor de telecomunicações, onde são analisados, aplicados e discutidos modelos de otimização com abordagem nó-arco e arco-caminho. A análise é orientada à minimização do custo atendendo a demanda prevista. Os principais componentes de rede, de serviços e de custos são identificados e os modelos são desenvolvidos para determinar a configuração de rede ou de prestação de serviços. Os modelos permitem uma maior flexibilidade e um alto grau de interação com o planejador. Estas características possibilitam analisar variados cenários onde há imprecisão, tanto para a seleção de serviços, quanto para a implantação de rede. Para garantir a validação prática da metodologia desenvolvida, resultados de experimentos computacionais são apresentados e discutidos. Destacam-se nos resultados: (1) a possibilidade de realizar um planejamento multi-serviço, com possibilidade de atribuir prioridades no atendimento dos serviços e (2) eficácia do modelo, para a implantação de rede, onde se obteve um ganho de 2% na solução ótima, em uma instância de teste do repositório SNDlib.

Palavras-chave: Sistemas de telecomunicações, Lógica *Fuzzy*, Sistemas de Apoio à Decisão e Programação Linear Inteira Mista.

ABSTRACT

Telecommunications experience accelerated evolution. The environment is very competitive and the volume of financial resources involved is significant. The variety of available technologies makes system planning stage, a procedure not only desirable but necessary, especially in a competitive environment. The use of comprehensive and flexible methodologies that can assist in decision-making, based on mathematical optimization models, it seems an inevitable way. This paper presents mathematical models based on operational research, mixed integer linear programming (MILP) and fuzzy logic to assist in strategic planning and decision-making, for the telecommunications industry, where they are analyzed, discussed and applied optimization models approach node-arc and arc-path. The analysis is focused on minimizing the cost given the expected demand. The main network components, services and costs are identified and models are developed to determine the network configuration or service. The models allow for greater flexibility and a high degree of interaction with the planner. These characteristics make it possible to analyze various scenarios where there is inaccuracy, both for the selection of services and for network deployment. To ensure the practical validation of the methodology, results of computational experiments are presented and discussed. Noteworthy are the results: (1) the possibility of holding a multi-service planning, with the possibility of assigning priorities in the services and care (2) effectiveness of the model for network deployment, which revealed a gain of 2% in the optimal solution in a test instance of SNDlib repository.

Keywords: *Telecommunications systems, Fuzzy Logic, Decision Support Systems and Linear Mixed Integer Programming.*

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	1
1.1 – CONTEXTUALIZAÇÃO E PROBLEMÁTICA	1
1.2 – OBJETIVOS	4
1.2.1 – OBJETIVOS ESPECÍFICOS	4
1.3 – JUSTIFICATIVA	5
1.4 – ESTRUTURA DO TRABALHO	6
FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	8
2.1 – INTRODUÇÃO	8
2.2 – SISTEMAS DE TELECOMUNICAÇÕES.....	8
2.3 – SISTEMAS DE ACESSO EM TELECOMUNICAÇÕES.....	10
2.4 – O SISTEMA DE ACESSO MÓVEL CELULAR	11
2.5 – DIMENSIONAMENTO DE UM SISTEMA MÓVEL CELULAR	12
2.6 – TECNOLOGIA PARA INTERCONEXÃO ENTRE ERBs E CCC.....	13
2.7 – PROGRAMAÇÃO LINEAR.....	14
2.8 – FORMULAÇÃO NÓ-ARCO E ARCO-CAMINHO	16
2.8.1 – FORMULAÇÃO NÓ-ARCO.....	17
2.8.2 – FORMULAÇÃO ARCO-CAMINHO	18
2.9 – LÓGICA FUZZY.....	18
METODOLOGIA DE PLANEJAMENTO DE SISTEMAS DE ACESSO	20
3.1 – INTRODUÇÃO	20
3.2 – DEFINIÇÕES DE SERVIÇOS	20
3.3 – DEFINIÇÃO DA REDE	21
3.4 – ESCOLHAS DAS SOLUÇÕES TECNOLÓGICAS	21
3.5 – CRITÉRIOS DE OTIMIZAÇÃO.....	22
3.6 – ALOCAÇÃO E DIMENSIONAMENTO DE EQUIPAMENTOS.....	25
3.7 – ANÁLISE ECONOMICA.....	25
MODELOS MATEMÁTICOS	27
4.1 – INTRODUÇÃO	27
4.2 – MODELAGEM NÓ-ARCO – ALUGUEL DE REDE	27
4.2.1 – REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DA REDE.....	27
4.2.2 – FORMULAÇÃO MATEMÁTICA.....	29
4.3 – MODELAGEM NÓ-ARCO – CONTRATAÇÃO DE SERVIÇOS	31

4.3.1 – REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DA REDE.....	31
4.3.2 – FORMULAÇÃO MATEMÁTICA.....	33
4.4 – MODELAGEM ARCO-CAMINHO.....	35
4.4.1 – REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DA REDE.....	35
4.4.2 – FORMULAÇÃO MATEMÁTICA.....	37
4.5– MODELAGEM DOS DADOS IMPRECISOS	39
4.5.1 – MODELAGEM PARA A ABORDAGEM NÓ-ARCO	40
4.5.2 – MODELAGEM PARA A ABORDAGEM ARCO-CAMINHO	42
RESULTADOS	45
5.1 – INTRODUÇÃO	45
5.2 – APLICAÇÃO DO MODELO NÓ-ARCO - CONTRATAÇÃO DE SERVIÇOS.....	45
5.2.1 – SERVIÇOS CORPORATIVOS E SOLUÇÕES TECNOLÓGICAS	46
5.2.2 – O MODELO NÓ-ARCO UTILIZADO.....	46
5.2.3 – AVALIAÇÃO TÉCNICO-ECONÔMICA.....	49
5.2.4 – CENÁRIOS ESTUDADOS	50
5.2.5 – RESULTADOS OBTIDOS	51
5.3 – APLICAÇÃO DO MODELO ARCO-CAMINHO.....	54
5.3.1 – REDE ESTUDADA.....	55
5.3.2 – RESULTADOS OBTIDOS	58
CONCLUSÃO	63
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	66
APÊNDICE I	71
APÊNDICE II	73
APÊNDICE III	77
ANEXO I	80

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Principais componentes de um sistema de telecomunicações.	9
Figura 2 - Sistema móvel celular.	11
Figura 3 - Interconexão ERBs-CCC utilizando sistemas SDH.	14
Figura 4 - Estrutura geral de modelagem.	16
Figura 5 - Rede com três nós.	17
Figura 6 - Fluxo de demanda.	17
Figura 7 - Possibilidades de caminhos para rede de três nós.	18
Figura 8 - Rede para aluguel.	28
Figura 9 - Fluxo de demanda para os serviços a serem contratados.	32
Figura 10 - Topologia rede arco-caminho.	35
Figura 11 - Modelagem triangular para demanda – Função de pertinência.	40
Figura 12 - Modelagem triangular para custo – Função de pertinência.	41
Figura 13 - Modelagem Multi-níveis.	42
Figura 14 - Modelagem trapezoidal – Função de pertinência.	43
Figura 15 - Curva de defuzzyficação.	44
Figura 16 - Procedimentos computacionais.	47
Figura 17 - Níveis de tarifas para cada serviço, em cada operadora, com seus pontos de ajuste, α_1 e α_2	51
Figura 18 - Custo total do contrato em VP (R\$) x Grau de confiança (α).	53
Figura 19 - Topologia da rede.	56
Figura 20 - Topologia de rede com grau de confiança de 0%.	59
Figura 21 - Topologia de rede com grau de confiança de 10%.	60
Figura 22 - Topologia de rede com grau de confiança de 50%.	61
Figura 23 - Topologia de rede com grau de confiança de 100%.	62

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Escoamento da demanda.	37
Tabela 2 - Valores de demanda prevista – número <i>fuzzy</i> triangular (em minutos).	50
Tabela 3 - Custos de manutenção e instalação convertidos em VP.....	50
Tabela 4 - Operadoras escolhidas em função do α nos dados de demanda.....	52
Tabela 5 - Demanda prevista imprecisa.	57
Tabela 6 - Demanda prevista – Valor Médio.	57
Tabela 7 - Resultado das simulações para diferentes valores do grau de confiança (α).	58

LISTA DE SIGLAS

AMPL – *A Modeling Language for Mathematical Programming* (Linguagem de Modelagem para Programação Matemática)

CATV – *Community Antenna TV* (TV a cabo)

CC – Central Local de Comutação

CCC – Central de Controle e Comutação (MSC – *Mobile Switching Center*)

CDMA-EV-DO – *Code Division Multiple Access-Enhanced Voice-Data Optimized* (Acesso Múltiplo por Divisão de Código – Voz Melhorada – Otimização de Dados)

CT – Central Telefônica

ERB – Estação Rádio Base (BTS – *Base Transceiver Station*)

EM – Estação Móvel (MS – *Mobile Station*)

E1 – Especificação de Taxa de Transmissão (2,048 Mbps)

ET – Estação Telefônica

HDSL – *High-data-rate Digital Subscriber Line* (Linha Digital de Assinante com Alta Taxa de Dados – Transmissão Simétrica)

HSPA – *High-Speed Downlink Packet Access*

IFC – *Installed First Cost* (Custo de Instalação)

IST – Índice de Serviços de Telecomunicações

IU – Central de Comutação Interurbana

LTE – *Long Term Evolution*

Mbps – *Megabits* por segundo

MILP – Programação Linear Inteira Mista

PDH – *Plesiochronous Digital Hierarchy*

PMO – Programação com Múltiplos Objetivos

QoS – *Quality of Service* (Qualidade do Serviço)

RDSI – Rede Digital de Serviços Integrados (ISDN – *Integrated Services Digital Network*)

RF – RadioFrequência

SDH – *Synchronous Digital Hierarchy* (Hierarquia Digital Síncrona)

SHDSL – *Symmetric high-speed digital subscriber line* (Linha Digital Simétrica de Assinante de Alta Velocidade)

SNDlib – *Survivable Network Design Library*

STM-N – *Synchronous Transport Module - Level N* (Módulo de Transporte Síncrono - Nível N)

VP – Valor Presente

WCDMA – *Wide-Band Code-Division Multiple Access* (Amplio Acesso Múltiplo por Divisão de Código)

3G – Terceira Geração do Sistema de Acesso Móvel Celular

4G – Quarta Geração do Sistema de Acesso Móvel Celular

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 – CONTEXTUALIZAÇÃO E PROBLEMÁTICA

Os sistemas de telecomunicações estão atualmente em fase de grande transformação e expansão, com o desenvolvimento de novos tipos de serviços, principalmente os de multimídia e de faixa-larga. O ambiente competitivo obriga as empresas operadoras a investirem continuamente, tanto na evolução tecnológica quanto nos serviços oferecidos. A expansão do sistema fica condicionada à análise das estratégias de mercado, as quais exigem o levantamento das demandas dos serviços e o estudo sobre as diferentes possibilidades tecnológicas a se adotar. Grandes velocidades de comutação, altas taxas de transmissão de dados, baixas taxas de erro e atrasos aceitáveis são alguns dos atrativos imprescindíveis para se conquistar e estimular a fidelidade de um cliente em potencial.

Os sistemas de acesso do usuário são exemplos de sistemas que passaram por mudanças importantes. Estes sistemas foram desenvolvidos, a princípio, para o provimento do serviço de voz. Atualmente, eles se encontram em contínua transformação, objetivando uma plataforma cada vez mais faixa-larga e multimídia.

No sistema móvel celular, criar condições para o sistema prover serviços com qualidade comparável àquela do sistema fixo cabeado é uma meta em constante avaliação. Além da mobilidade do usuário, inerente ao sistema, a tarefa de agregar novos serviços orienta duas frentes de estudo: uma é responsável pelo planejamento da área de cobertura (interface aérea) e a outra pelo dimensionamento da infraestrutura. Comumente, a primeira precede a segunda. A escolha da localização e altura das antenas gera os parâmetros necessários (por exemplo, demanda a ser atendida) para o dimensionamento dos equipamentos de transmissão e comutação. A oferta de serviços faixa-estreita e faixa-larga com qualidade estimulam a implantação de infraestruturas com alta capacidade e que sejam ao mesmo tempo robustas e flexíveis (NAWROCKI, 2006).

O planejamento do sistema fica condicionado a estas 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 (DESOUZA, 2014).

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.

Assim, a expansão dos sistemas de acesso 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-mercadoológicas 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.

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) (SAMANTA, 2013).

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 (WOLSEY, 2014). A resolução para este tipo de problema pode ser através de métodos exatos ou por métodos heurísticos. Embora em redes celulares o principal volume de tráfego ainda é a voz, a penetração de novos serviços de demanda com uma alta taxa de dados tem uma grande implicação sobre a rede, afetando significativamente o desempenho do sistema e cobertura de rede nestes sistemas.

O trabalho de Skianis (2013) apresenta os processos de planejamento e otimização de rede em sistemas móvel celular pontuando a importância e eficiência dos procedimentos automatizados para projetar e otimizar esses sistemas. Também são apresentados dois estudos de caso de redes reais, uma com 10 e outra com 11 nós, que mostraram as melhorias na operação da rede através da otimização. Verifica-se a necessidade de investir em infraestruturas de tecnologia da informação para fornecer monitorização contínua e análise dos dados da rede, bem como otimização rápida que reflete o tráfego, reconfiguração rápida e ajustes dos parâmetros da rede.

O problema de planejamento de rede é de difícil resolução de forma ideal. Existem abordagens com focos em determinados subproblemas principais, a rede celular, rede de acesso e a parte de planejamento da rede básica (ABDEL KHALEK, 2011). Como este problema combinatorial é de difícil resolução de forma exata (global) o trabalho de St-Hilaire (2012) apresenta um estudo do problema de planejamento de redes onde o objetivo é encontrar as melhores soluções para os problemas de planejamento de rede de grande porte (global) em uma quantidade razoável de tempo. Compara-se o método de programação linear inteira mista (com o *solver* CPLEX®) com os métodos heurísticos (busca local e método sequencial) e também com um modelo híbrido da programação linear com o método da busca sequencial, sendo essa a melhor solução para o objetivo buscado.

Como as redes precisam evoluir para se tornarem mais inteligentes, há uma necessidade de procedimentos de planejamento, monitoramento e otimização para entregar serviços de alta qualidade para os usuários finais. Ferramentas adicionais podem ser consideradas para melhorar ainda mais a utilização da rede. Um exemplo é a gestão de recursos (KOMNAKOS et al., 2010) que leva em direção a um sistema integrado de prestação de serviços. Além disso, uma vez que as operadoras móveis estão se movendo em direção ao LTE (*Long Term Evolution*), 4G (Quarta Geração), o conceito de redes heterogêneas está ganhando foco. Essa rede evoluída deve abranger várias tecnologias e bandas (LETOURNEUX et al., 2012).

Outra abordagem para o problema de planejamento de redes de telecomunicações, utilizando algoritmo genético, é apresentada no trabalho de Tripathy (2012). No método proposto, o cromossomo, bem como os genes são codificados de forma eficiente, de modo que o cruzamento forneça a solução ótima, com melhor taxa de convergência. O algoritmo mostrou ser eficiente para produzir boas soluções, mesmo para redes de grande porte. O algoritmo usa dois níveis de cruzamento para uma melhor taxa de convergência. O método é muito flexível e pode ser utilizado para objetivos alternativos, como por exemplo, minimizar o custo sujeito a restrições de confiabilidade.

1.2 – OBJETIVOS

Tendo em vista a conjuntura delineada anteriormente, este trabalho tem como objetivo tomar como base trabalhos atuais com modelo de Programação Linear Inteira Mista (PLIM) com utilização de lógica *fuzzy* (modelagem *fuzzy*-triangular, *fuzzy*-trapezoidal e multi-níveis) para verificar/analisar a modelagem nó-arco e arco-caminho.

1.2.1 – OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Primeiramente, analisar, adequar e aplicar o modelo de Programação Linear Inteira Mista (PLIM), modelagem nó-arco, para avaliação de contratos de fidelização na prestação de serviços corporativos de telecomunicações.

Posteriormente, analisar/adequar a aplicação do modelo de Programação Linear Inteira Mista (PLIM), modelagem arco-caminho, para avaliação de instâncias (destinos múltiplos de demanda – abordagem arco-caminho) da biblioteca SNDlib (*Survivable Network Design Library*), um repositório que contém instâncias de testes para problemas de otimização em redes de telecomunicações (ORLOWSKI, 2010).

Por fim, introduzir/avaliar o tratamentos de dados imprecisos no modelo arco-caminho da biblioteca SNDlib, com o objetivo de desenvolver um modelo que atenda o requisito de flexibilidade, sendo capaz de admitir dados imprecisos. A técnica explorada e aplicada é a de conjuntos *fuzzy*.

1.3 – JUSTIFICATIVA

O desenvolvimento assistido pelas indústrias de microeletrônica e informática gera a possibilidade de se oferecer diversas soluções tecnológicas passíveis de serem aplicadas no gerenciamento da informação. Tecnologias que, há até pouco tempo, tinham aplicação apenas em segmentos específicos da rede, como por exemplo, um *backbone* de entroncamento entre centrais telefônicas, já se apresentam economicamente viáveis para o oferecimento de serviços multimídia ao usuário final, com melhor qualidade de transmissão e com preços mais acessíveis. Estas mudanças levam as empresas operadoras dos sistemas de telecomunicações a assumirem novas posturas em todas as suas áreas de atuação, inclusive no que diz respeito ao planejamento da expansão do sistema, principalmente no segmento de acesso do usuário, onde a diversidade tecnológica e de serviços tende a ser mais acentuada.

O cenário mercadológico brasileiro atual, no qual a exploração dos serviços está a cargo de empresas de capital privado, sugere mudanças nas metodologias de planejamento tradicionais. A competição faz com que o dimensionamento dos sistemas contemple fatores técnicos e econômicos que vão além da simples 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 tendência necessária e inevitável. Assim, o planejamento precisa levar em consideração estes novos aspectos. Além disso, o porte dos problemas, a velocidade das transformações e as inúmeras possibilidades a analisar exigem metodologias de planejamento consistentes, flexíveis (suportando diferentes cenários) e apoiadas em ferramentas computacionais. Os valores

significativos geralmente envolvidos neste tipo de cenário tornam desejável o uso de modelos matemáticos de otimização, fundamentados na pesquisa operacional (TAHA, 2008).

Uma característica comum entre as metodologias de planejamento tradicionais é o fato de que o dimensionamento da rede depende da precisão com que os dados de entrada são apresentados aos modelos de suporte à decisão. Assim, os dados, como por exemplo, a aceitação de um determinado serviço, são elementos fundamentais que precisam ser fornecidos pelo planejador. Porém, informações “precisas” nem sempre estão disponíveis durante a etapa de planejamento, o que é natural num contexto de rápido desenvolvimento tecnológico, principalmente quando se fala em novas tecnologias e serviços. O resultado do planejamento, portanto, pode ser sensível à variação nestes dados de entrada.

A alocação e dimensionamento dos componentes da rede e a configuração de oferecimento dos serviços serão os objetos principais de estudo/análise deste trabalho. Com o objetivo de obter modelos matemáticos mais robustos, capazes de avaliar o dimensionamento dos sistemas para diferentes cenários, técnicas de inteligência computacional, como por exemplo, a lógica *fuzzy* (SAHINIDIS, 2004), (PERYCZ e GOMIDE, 1998), são agregadas à metodologia.

1.4 – ESTRUTURA DO TRABALHO

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 formas de acesso do usuário. Adicionalmente, os serviços são caracterizados e a necessidade de expansão dos sistemas é estabelecida. A descrição não pretende ser completa, mas é suficiente para o nível de detalhe seguido no restante do trabalho. Descreve quais as soluções tecnológicas que podem ser utilizadas na expansão dos dois sistemas de acesso, fixo cabeado ou móvel celular. Os diferentes meios de transmissão (cabo metálico, cabo de fibras, sistemas rádio) são apresentados. São especificadas topologias, configurações de nós e equipamentos. Também se apresenta conceitos de programação linear e os tipos de formulações que podem ser utilizadas com ela (nó-arco e arco-caminho). E para o tratamento de dados imprecisos, discute-se conceitos da lógica *fuzzy*.

Capítulo 3 – discute o problema do planejamento de sistemas de acesso e propõe uma metodologia para realizá-lo. Apresenta os procedimentos mínimos necessários a serem

realizados pelo planejador para desenvolver os estudos de evolução da rede. Um dos destaques fica por conta da escolha do critério de otimização. O planejamento orientado à minimização é o mais explorado.

Capítulo 4 – apresenta as descrições dos modelos matemáticos de Programação Linear Inteira Mista (PLIM), com variáveis 0-1, descrevendo a modelagem nó-arco (para contratação de serviços de telecomunicações e aluguel de rede em um sistema móvel celular) e arco-caminho (para custo de implantação de rede de uma topologia da biblioteca SNDlib). Para tornar os modelos mais flexíveis absorvendo dados imprecisos, descreve-se a modelagem *fuzzy*, apresentando definições de modelagem *fuzzy*-triangular, *fuzzy*-trapezoidal e multi-níveis.

Capítulo 5 – são discutidas aplicações dos modelos (nó-arco e arco-caminho) de minimização de custo para implantação de rede e serviços de telecomunicações. O estudo é dirigido segundo a imprecisão em algumas variáveis.

Capítulo 6 – discute a aplicação completa da metodologia no planejamento de sistemas de telecomunicações e relata as aplicações dos modelos com dados imprecisos tanto para a seleção de serviços em telecomunicações quanto para a implantação de uma rede *backbone* e apresenta sugestões para trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 – INTRODUÇÃO

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 muitas maneiras 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. Até há pouco tempo, as funções eram divididas, por exemplo, entre operadoras de TV a cabo (CATV), provedores de internet e operadoras de telefonia fixa e/ou móvel. Cada qual era (ou ainda é) responsável por um segmento de rede e por uma parcela do portfólio de serviços. O sistema de telefonia ainda é o que apresenta maior apelo popular, sendo altamente capitalizado, o que possibilita às empresas operadoras do sistema a disponibilização do serviço de voz a milhões de usuários. O maior desafio destas empresas operadoras é adaptar suas redes para o fornecimento de novos serviços, os quais exigem taxas de transmissão bem mais elevadas que aquela necessária para o serviço de voz convencional. Dentro do sistema de telefonia, as maiores transformações estão ocorrendo no segmento chamado rede de acesso, portanto, é um dos principais focos de atenção deste projeto.

2.2 – SISTEMAS DE TELECOMUNICAÇÕES

O sistema de telecomunicações aqui tratado é baseado na rede nacional de telefonia, a qual se encontra em constante evolução, no sentido de habilitar-se à prestação de novos serviços, além daquele de voz. A Figura 1 apresenta os principais componentes deste sistema.

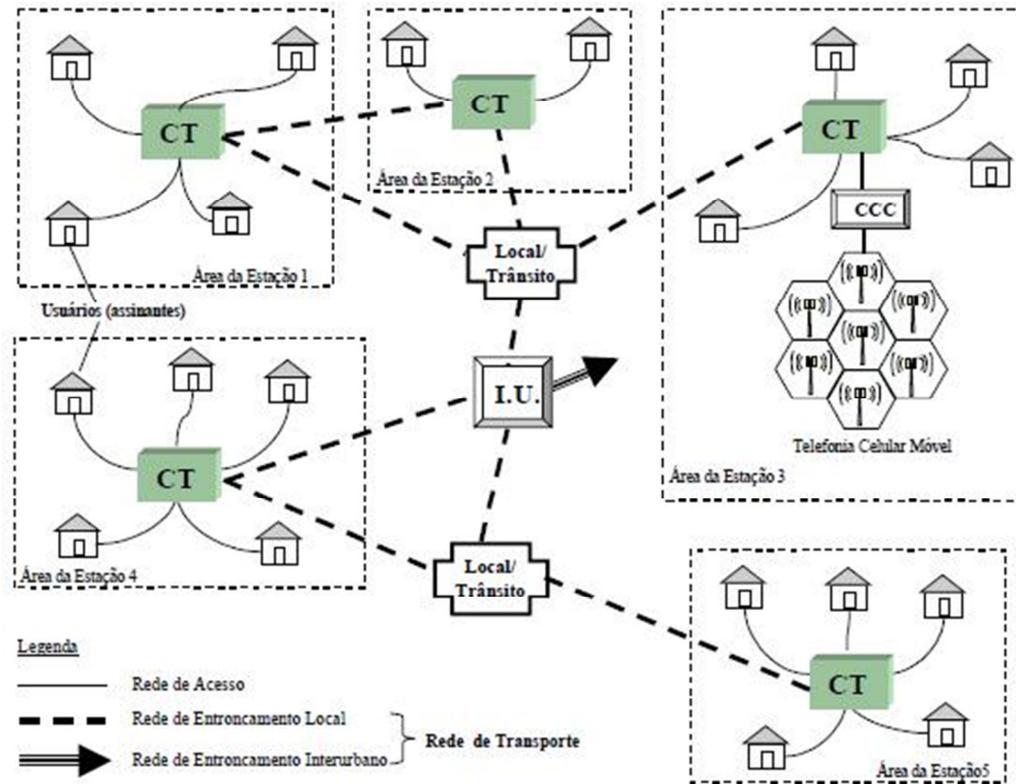


Figura 1 - Principais componentes de um sistema de telecomunicações.

Neste sistema cada usuário (denominado assinante) é ligado a uma central telefônica (CT). Na CT, equipamentos de comutação (as Centrais Locais de Comutação - CC) permitem que cada assinante possa se comunicar com os demais. Em função da capacidade de processamento, tecnologia empregada e critérios de planejamento, o sistema pode ser dividido em três níveis hierárquicos: Sistema de Acesso, Rede de Entroncamento Local e Rede de Entroncamento Interurbano. A seguir é descrito cada um destes segmentos.

Sistema de Acesso: É a coleção de equipamentos e infraestrutura necessária para realizar a interligação dos assinantes às suas respectivas estações telefônicas. Cada CT pode atender um determinado número de assinantes cobrindo uma Área de Estação ou Área de Atendimento. O sistema de acesso pode ser dimensionado em várias topologias: ponto-a-ponto, ponto-multi-ponto ou barramento compartilhado. O planejamento desta parcela do sistema de telecomunicações é o objeto de interesse deste trabalho. Posteriormente ela será descrita com maiores detalhes.

Rede de Entroncamento Local: Esta parcela do sistema de telecomunicações é comumente chamada de Rede de Transporte. Ela promove a interligação de CTs de uma mesma área local, como, por exemplo, uma cidade, para permitir a conexão entre assinantes de diferentes áreas de atendimento. As CTs são ligadas diretamente entre si ou através de Centrais-Tandem.

Atualmente, a fibra óptica é o meio de transmissão mais utilizado na rede de entroncamento local, o que possibilita o tráfego de informações em altas velocidades.

Rede de Entroncamento Interurbano: A interligação entre as diferentes áreas locais é feita através de Centrais de Comutação Interurbana (IU). Diversos sistemas de transmissão podem ser usados, dependendo das distâncias e do tráfego existente. Podem ser usadas fibras ópticas, enlaces via rádio micro-ondas e até mesmo conexões por satélite.

2.3 – SISTEMAS DE ACESSO EM TELECOMUNICAÇÕES

Os sistemas de acesso representam a porta de entrada de cada usuário (denominado/assinante/cliente) para o sistema de telecomunicações. Tradicionalmente, o acesso fixo a conexão é feito através de cabos de cobre que conectam o assinante a um ponto de concentração, o nó de acesso. Esse segmento da rede recebe o nome de rede de distribuição. A partir do nó de acesso, os assinantes são ligados à central de comutação- CC (ou estação telefônica - ET) por meio de enlaces de maior capacidade e/ou são concentrados de maneira a compartilhar o mesmo meio de transmissão. Esse segmento recebe o nome de rede de alimentação, e o sistema de transmissão mais adotado pelas empresas operadoras atualmente é aquele que utiliza fibra óptica (KUMAR, 2014). A rede de distribuição e a rede de alimentação constituem o sistema de acesso fixo.

Nos sistemas de acesso móvel celular, o usuário é conectado ao sistema através da interface aérea localizada na estação radio base - ERB (antena). No Brasil, os padrões predominantes, atualmente, neste segmento da rede, são o WCDMA/HSPA (*Wide-Band Code-Division Multiple Access / High-Speed Downlink Packet Access*) e o CDMA-EV-DO (*Code Division Multiple Access - Enhanced Voice-Data Optimized*) para a 3G (Terceira Geração), e o LTE (*Long Term Evolution*) para a 4G (Quarta Geração). Informações mais detalhadas sobre estes padrões e o mercado de acesso móvel celular podem ser encontradas em Teleco (2015).

O planejamento da infraestrutura do sistema de acesso móvel celular, ou seja, a interconexão entre ERBs e Central de Comutação e Controle (CCC), pode ser feito de forma análoga ao proposto para a rede de alimentação, do sistema de acesso fixo. Aqui podem ser acrescentadas ainda como meio de transmissão os modems HDSL (redes de cobre) e os sistemas via rádio micro-ondas.

Em ambos os sistemas de acesso (fixo ou móvel), se dois assinantes não pertencem à área coberta por uma mesma central de comutação, a ligação entre eles envolverá duas ou mais centrais de comutação, interligadas por uma rede de entroncamento (ou *backbone*).

Novas tecnologias de acesso, comutação e transmissão permitem o suporte para vários tipos de serviço: voz, dados em baixa e alta velocidade, videofone, videoconferência, tele-educação, etc. Os seus principais atributos, a serem considerados durante a etapa de planejamento do sistema são: taxa (velocidade) de transmissão, tipo de comutação (por circuito ou por pacotes), taxa de penetração (aceitação) na área em estudo, exigência (ou não) de mobilidade, a sua receita unitária (mensal ou anual) e, conseqüentemente, as suas restrições técnicas quanto à qualidade de oferecimento e cobertura. Um dos grandes desafios das empresas de telecomunicações é definir o cardápio de serviços que elas deverão oferecer. Em função destas indefinições, as metodologias de planejamento procuram organizá-los em grupos ou classes afins. Esta técnica também será adotada neste trabalho.

2.4 – O SISTEMA DE ACESSO MÓVEL CELULAR

A finalidade de um sistema de comunicação móvel celular é permitir a comunicação entre duas Estações Móveis (EM) ou entre EM e as redes fixas de telefonia e internet. Uma rede móvel celular é composta dos elementos indicados na Figura 2. Informações mais detalhadas podem ser obtidas em (JESZENSKY, 2004).

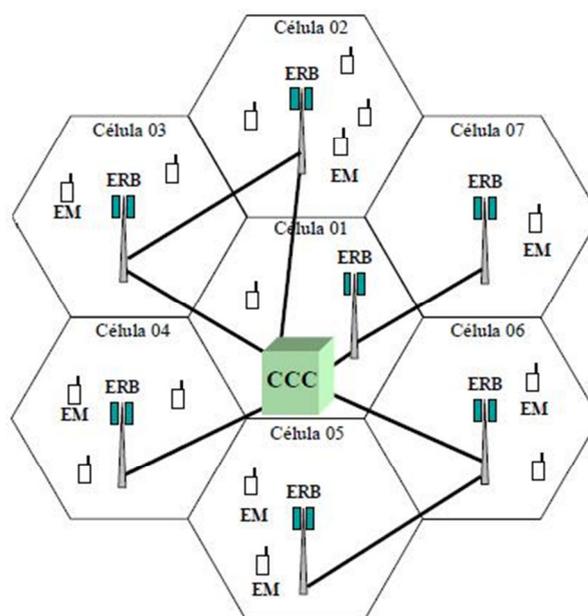


Figura 2 - Sistema móvel celular.

Tem-se a Central de Comutação e Controle (CCC) – *Mobile Switching Cente* (MSC) que é o “coração” do sistema, sendo basicamente um computador de alta capacidade de processamento, que usa pacotes de softwares projetados para endereçar aplicações específicas de telecomunicações. A CCC é responsável pelo processamento das chamadas, monitoração, tarifação, conexão com outros sistemas de telecomunicações, entre outros.

Existe também como parte desse sistema a Estação Radio Base (ERB) – *Base Transceiver Station* (BTS), cujo termo “Estação Rádio Base” é utilizado para nomear um conjunto de equipamentos que realizam a interface aérea entre o assinante e o sistema móvel. O equipamento de rádio tem potência limitada, o que define a sua área geográfica de atendimento, chamada de célula. Para garantir o acesso ao usuário, a ERB é composta de fontes de energia, sistemas de emergência (baterias e grupos geradores), sistema de controle da estação, transceptores de rádio frequência, amplificadores de potência e sistema irradiante (LAIHO, 2006).

Outro elemento do sistema é a Estação Móvel (EM) – *Mobile Station* (MS), que é um equipamento de rádio que é formado por uma unidade transceptora que transmite e recebe o sinal de RF (radiofrequência). Essa unidade móvel tem potência limitada e normalmente são fabricadas de acordo com o sistema de acesso do sistema. Atualmente, podem ter agendas, organizadores de compromissos, *smartphones*, máquina fotográfica, *tablets*, entre outros.

Uma parte importante dentro desse sistema móvel celular são os equipamentos de transmissão. A interconexão entre as ERBs e a CCC é realizada através de *links* de canais E1 (sistema de transmissão bidirecional com taxa básica de 2,048Mbps). Dependendo da localização das ERBs em relação a CCC e da demanda de usuários prevista para ser atendida em cada ERB, os canais E1 que serão utilizados para a interconexão podem ser implantados pela própria operadora ou serem alugados de outra operadora de telecomunicações que já possua infraestrutura de rede nas áreas a serem cobertas pelas ERBs.

2.5 – DIMENSIONAMENTO DE UM SISTEMA MÓVEL CELULAR

Dimensionar o sistema móvel celular não é uma tarefa trivial. Para facilitar, o planejamento costuma ser realizado em duas etapas:

- **Localização/Dimensionamento das ERBs:** A conexão do usuário ao sistema é de responsabilidade da ERB. Ela é composta por uma interface para a terminação da rede de interconexão fixa, funções de modulação e demodulação, equipamentos rádio de

transmissão e recepção. Pode ser alocada em torres, postes ou até mesmo sobre um telhado. Nesta etapa do dimensionamento são definidas a altura das antenas, a área de cobertura, a alocação de frequências, e conseqüentemente a demanda a ser atendida em cada ERB. Vale salientar que este não é um procedimento trivial, uma vez que se deve analisar um espectro de frequências que em sua maioria é bem restrito, bem como as interferências inerentes aos sistemas rádio.

- **Dimensionamento da Infraestrutura:** Esta etapa é realizada, geralmente, de forma sequencial à anterior. Os dados referentes à localização/dimensionamento das ERBs são usados como dados de entrada para o planejamento da infraestrutura, que, por sua vez, deve ser capaz de escoar o tráfego dos usuários, levando-se em conta as diversas opções tecnológicas disponíveis, escolhendo-se uma ou mais com melhor relação custo/benefício.

Nesta etapa do planejamento são definidos quais sistemas de transmissão deverão ser utilizados para fazer a interconexão entre as ERBs e a CCC. Dentre as soluções tecnológicas que podem ser utilizadas destacam-se o modem HDSL (*High-data-rate Digital Subscriber Line*), modem óptico, e o enlace via rádio micro-ondas. A modelagem matemática para o planejamento estratégico da infraestrutura de interconexão entre ERBs, e destas com a CCC, é parte integrante deste trabalho.

2.6 – TECNOLOGIA PARA INTERCONEXÃO ENTRE ERBs E CCC

A solução tecnológica mais utilizada para interconectar ERBs com ERBs e ERBs com a CCC em um sistema móvel tem sido os sistemas SDH (*Synchronous Digital Hierarchy*) transmitindo sobre fibra ótica. Outras soluções também podem ser encontradas no mercado, tais como os modems SHDSL (*Symmetric high-speed digital subscriber line* ou Linha Digital Simétrica de Assinante de Alta Velocidade) (DIGITEL, 2015) e rádio microondas (ERICSSON, 2015).

A solução de transmissão utilizando fibra óptica permite maior largura de banda, ou seja, maior quantidade de informação por unidade de tempo. Sendo uma solução ponto-a-ponto possui maior alcance, é imune a interferências eletromagnéticas e possui maior confiabilidade. Levando em consideração a constituição modular e o sistema de gerenciamento, os sistemas SDH podem ser classificados em várias versões de capacidade, como por exemplo, 16xE1, 21xE1, 42xE1, 63xE1 ou 252xE1, nas configurações 1+0, ou seja,

sem reserva de *link* e 1+1 com reserva de *link*. A sua capacidade pode ser ampliada com a adição de novos módulos, mesmo com o equipamento estando em operação.

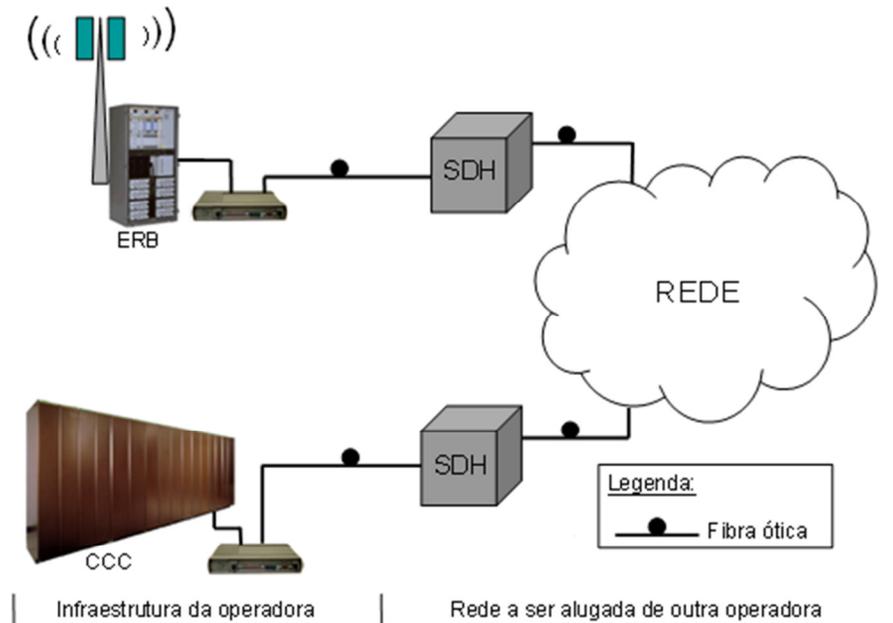


Figura 3 - Interconexão ERBs-CCC utilizando sistemas SDH.

A Figura 3 mostra a utilização de sistemas SDH no processo de interconexão entre ERBs e a CCC. Essa interconexão pode ser feita adotando ligações ponto-a-ponto, nas topologias estrela simples, dupla estrela, rota ou anel. A Figura 3 representa um cenário mercadológico avaliado em DeOliveira et al., (2011), onde a operadora pretende interligar as suas ERBs com a CCC através de *links* alugados de outra operadora de rede. A possibilidade de aluguel de rede existe porque os sistemas SDH atuais possuem capacidade de transmissão bastante elevada, o que permite as empresas operadoras de rede implantar sistemas com capacidades superiores às suas demandas. Existindo folga no seu sistema, a operadora de rede pode disponibilizar *links* (alugar) para outras empresas. Especificações técnicas mais detalhadas sobre os equipamentos SDH são ser encontradas em Asga (2015).

2.7 – 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 apresenta problemas de otimização nos quais a função objetivo e as restrições são todas lineares (BAZARAA et al., 2010). A seguir é formulado um problema de programação linear. Qualquer tipo de problema geral de programação linear pode ser apresentado desta forma. Um modelo de otimização de programação linear possui a seguinte estrutura:

Maximizar/minimizar: $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$

Satisfazendo: $g_1(x_1, x_2, \dots, x_n) \{ \leq = \geq \} b_1$

$$g_2(x_1, x_2, \dots, x_n) \{ \leq = \geq \} b_2$$

$$g_m(x_1, x_2, \dots, x_n) \{ \leq = \geq \} b_m$$

Em que: $f(x)$: Função Objetivo.

g : Restrições.

x : Variáveis de projeto.

A função objetivo é a função que expressa o principal objetivo buscado, 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 4.

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 (BAZARAA et al., 2010). A programação linear juntamente com a disponibilidade de técnicas de solução programável como o método Simplex, descrito por Dantzig (1998) e o método de *branch-and-bound* que foi desenvolvido a partir do trabalho de Land e Doig (1960), facilita sua aplicação. Estas técnicas são amplamente utilizadas, pois possuem habilidades para modelar importantes e complexos problemas de decisão. O método Simplex tem a capacidade de produzir rapidamente soluções. A descrição do método Simplex por ser encontrada em Zionts (1974).

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.

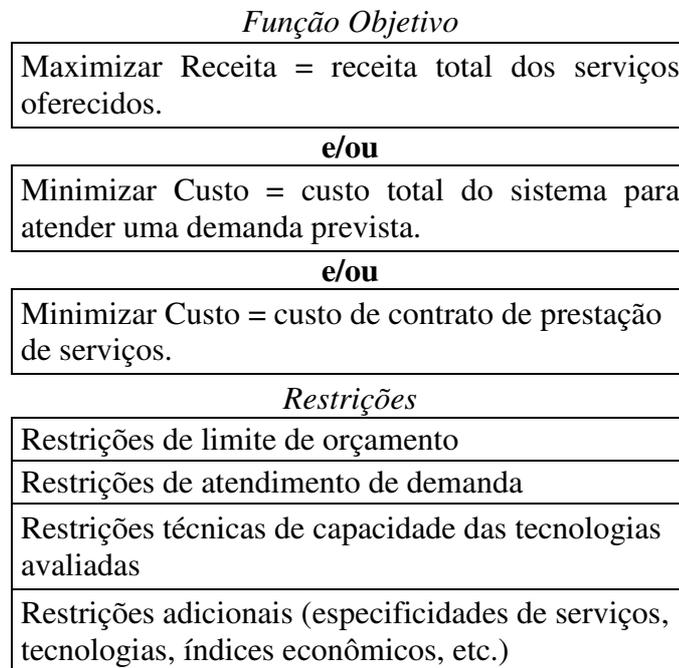


Figura 4 - Estrutura geral de modelagem.

Alguns problemas requerem o uso de variáveis que assumem somente valores inteiros e quando isso ocorre tem-se um problema de programação linear inteira. Alguns modelos práticos de programação linear inteira restringem algumas variáveis inteiras para valores “0” ou “1” e neste caso, tem-se um problema de programação linear inteira mista (PLIM). Este modelo 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.

2.8 – FORMULAÇÃO NÓ-ARCO E ARCO-CAMINHO

Quando se trabalha com programação linear pode-se utilizar dois tipos de formulações: 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 (BAZARAA et al., 2010). É utilizada uma rede simples, que consiste de três nós (Figura 5) para entendimento das formulações, onde cada nó está conectado a outros dois nós, isto é, a topologia da rede se parece com um triângulo.

2.8.1 – 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.

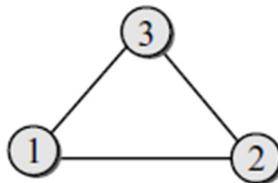


Figura 5 - Rede com três nós.

Fonte: Adaptado de Pióro 2004.

Nesta formulação há sempre um destino específico. A Figura 6 apresenta o fluxo de demanda para a rede de três nós representada na Figura 5.

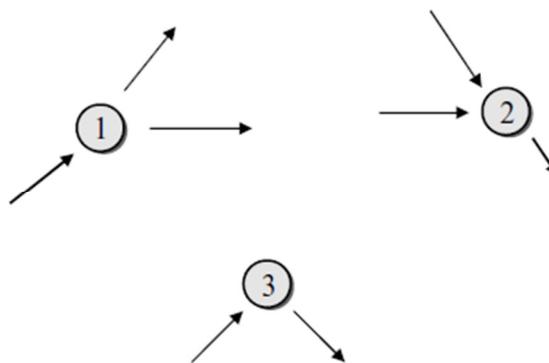


Figura 6 - Fluxo de demanda.

Fonte: Adaptado de Pióro 2004.

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.

2.8.2 – FORMULAÇÃO ARCO-CAMINHO

A matriz de incidência na formulação arco-caminho é formada a partir da definição de conjuntos de rotas, formado por rotas pré-estabelecidas. A Figura 7 apresenta as possibilidades de rotas para a rede de três nós representada na Figura 5.

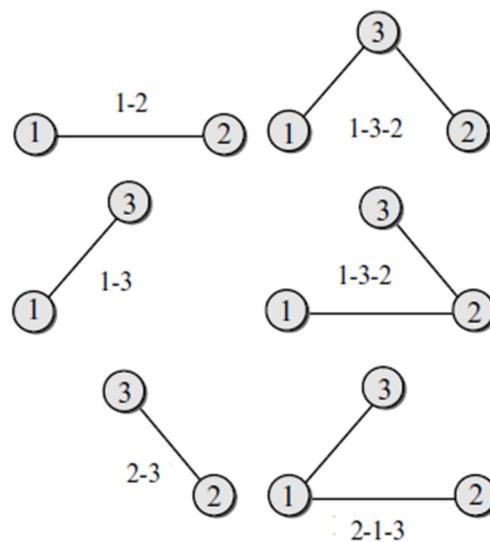


Figura 7 - Possibilidades de caminhos para rede de três nós.

Fonte: Adaptado de Pióro 2004.

Nesta formulação múltiplas demandas precisam ser encaminhadas na rede ao mesmo tempo e competem os recursos disponíveis (capacidades dos *links*). 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 (PIÓRO, 2004).

2.9 – LÓGICA FUZZY

Os conceitos dos conjuntos *fuzzy* foram criados inicialmente pelo professor Lofti Asker Zadeh e estendidos posteriormente por outros pesquisadores. Consistem em classes de objetos com graus de pertinência contínuos (ZADEH, 1965). Os conjuntos *fuzzy* permitem distinguir classes de objetivos sem limites claros, facilitando lidar com dados incertos ou

imprecisos. Surgiram exatamente da necessidade de encontrar os limites entre elementos de diferentes conjuntos. Para definir quanto um elemento pertence a um conjunto, utiliza-se a função de pertinência. A função de pertinência é uma função que associa um ponto no conjunto x a um número real, normalmente compreendido entre o intervalo $[0, 1]$, então, uma premissa varia em grau de verdade de “0” a “1”, o que leva a ser parcialmente verdadeira ou parcialmente falsa.

A lógica *fuzzy* (lógica difusa ou lógica nebulosa) também 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 (GEORGE, 2008). 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, sigmoidal, polinomial assimétrica, S-shape. As funções mais utilizadas são as triangulares e trapezoidais, por serem mais fácil de implementação.

Para situações que requerem uma resposta numérica, o conjunto *fuzzy* da saída é transformado num valor único pelo processo de defuzzificação, ou seja, o valor da variável linguística de saída inferida pelas regras *fuzzy* será traduzido em um valor discreto (DRIANKOV, 2013).

CAPÍTULO 3

METODOLOGIA DE PLANEJAMENTO DE SISTEMAS DE ACESSO

3.1 – INTRODUÇÃO

Os sistemas de acesso vêm experimentando uma significativa transformação nos últimos anos. A evolução tecnológica possibilita a prestação de novos serviços, cada vez mais baratos e de melhor qualidade. As metodologias de planejamento a serem desenvolvidas e aplicadas precisam ser flexíveis o suficiente para contemplar essa diversidade de cenários, de maneira mais atual e realista.

A seguir é proposta uma metodologia de planejamento para os sistemas de acesso fixo ou móvel. Ela refere-se aos procedimentos mínimos necessários a serem realizados pelo planejador para efetuar os estudos de evolução da rede.

3.2 – DEFINIÇÕES DE SERVIÇOS

O planejador só tem condições de escolher as soluções tecnológicas de acesso que serão consideradas em um estudo após definir os serviços a ser oferecidos. Isso porque só após a escolha dos serviços é possível verificar quais tipos de rede terão condições de suportá-los.

Para cada serviço selecionado (voz, dados, etc.), o planejador deverá definir o seu perfil (Qualidade do Serviço - QoS), sua taxa de aceitação na área em estudo e a sua receita (mensal ou anual) estimada por canal, para cada estágio do horizonte de planejamento considerado.

Num eventual estudo de caso a ser realizado para uma operadora, os dados de aceitação de serviços poderão ser oferecidos pela própria empresa. As projeções de demanda variam de região para região, ou mesmo de bairro para bairro numa mesma cidade. No caso particular do Brasil, algumas regiões ainda apresentam altos índices de demanda reprimida para o serviço de voz, tanto para o fixo quanto para o móvel. Portanto, a variação desta demanda ao longo do horizonte de planejamento também precisa ser acompanhada.

Quanto às estimativas de receita, os dados variam de país para país e, assim como para a aceitação, as projeções de tarifa também irão se modificar ao longo do tempo. Existe uma

tendência de queda destes valores em função de um ambiente de maior concorrência e maturidade tecnológica.

3.3 – DEFINIÇÃO DA REDE

Conforme discutido no Capítulo 2, a área de atendimento de um sistema de acesso é aquela delimitada por uma central de comutação. A rede pode ser representada por um grafo, composto por arcos e nós. Cada trecho da rede (arco do grafo) representa as conexões físicas entre os nós e possui como atributos, por exemplo, quantidade de pares metálicos e dutos disponíveis. Existem basicamente três tipos de nós:

Nó de CC: corresponde ao prédio onde está localizada a central (ou centrais) de comutação – CCC no sistema móvel celular;

Nó de Acesso: é um ponto intermediário entre a CCC e o usuário (por exemplo, armário de distribuição da ERB no sistema móvel celular), onde estão localizados equipamentos ativos da rede;

Nó de Usuário: é um ponto terminal no sistema, onde se localiza ou se encontra o assinante. Para simplificar o planejamento e diminuir a quantidade de dados a ser usada, pode-se considerar como ponto de concentração de demanda o nó de acesso, ou seja, em cada nó de acesso deve ser conhecida a demanda de todos os serviços considerados, para cada estágio de planejamento, se for o caso.

3.4 – ESCOLHAS DAS SOLUÇÕES TECNOLÓGICAS

Conhecendo o cardápio de serviços a ser oferecido e o tipo de rede a ser dimensionada, o planejador pode escolher quais são as soluções tecnológicas que participarão do estudo de caso. A escolha de uma solução traz implicações práticas imediatas, tais como:

- Saber quais são todos os dispositivos de rede (equipamentos, cabos, infraestrutura, etc.) a serem considerados para efeito de planejamento;
- Saber como são dimensionados os equipamentos nos nós da rede (nó de CC, nó de acesso e nó de usuário);
- Estimar o custo de cada dispositivo considerado para cada período de planejamento.

O levantamento dessas informações requer muito trabalho, principalmente se as soluções tecnológicas forem recentes. Para algumas situações, a falta de dados pode inviabilizar o uso de determinada solução tecnológica em um estudo de caso.

Um estudo de caso é composto por vários cenários. Um cenário pode utilizar uma ou mais soluções tecnológicas. Como se observa, pode-se utilizar uma ou mais soluções tecnológicas em um mesmo cenário. Essa mistura pode ocorrer em diferentes estágios do planejamento ou no mesmo estágio. Tecnicamente, a quantidade de combinações possíveis é enorme. Na prática, o planejador deve analisar quais são os cenários que mais se aproximam da realidade da sua operadora e, a partir daí, buscar os dados para poder realizar o estudo de caso.

3.5 – CRITÉRIOS DE OTIMIZAÇÃO

Os problemas de planejamento são majoritariamente problemas nos quais vários critérios ou objetivos conflitantes e distintos concorrem entre si. Os objetivos a serem alcançados podem, portanto, variar de uma empresa para outra diante das incertezas tecnológicas e de mercado. Mas em qualquer caso o planejamento da rede pode ser realizado de forma otimizada, utilizando-se modelos matemáticos. Os critérios mais significativos e prováveis de serem adotados pelas empresas operadoras estão descritos a seguir.

Atender Toda a Demanda Prevista a um Custo Mínimo

No planejamento de sistemas de acesso os valores envolvidos (principalmente custo de equipamentos) são bastante significativos. Nesta abordagem, a rede é dimensionada de forma a oferecer o menor custo, seja de aluguel, de implantação e/ou de operação e manutenção. Toda a demanda prevista deverá ser atendida, respeitando as especificações técnicas dos equipamentos alocados. Este foi o critério adotado pelas empresas operadoras brasileiras durante o cenário monopolista (antes das privatizações) e que, atualmente, tende a perder importância, uma vez que as empresas privadas, além de contarem com a possibilidade de redes mais baratas, têm como prioridade a rentabilidade do investimento.

Maximização da Folga

Este critério privilegia a adoção de equipamentos com capacidade de sobra, visando preparar a rede para a evolução da demanda segundo um horizonte de planejamento. Na prática, existe também a necessidade de se respeitar um orçamento, o que impede a escolha de alternativas irrealizáveis.

Maximização da Demanda Protegida

Algumas tecnologias permitem um dimensionamento capaz de oferecer pelo menos duas maneiras alternativas de escoar a demanda do usuário até a sua central de comutação. Sob este critério, são conferidos privilégios a essas tecnologias quanto em competição com outras.

Maximização de Receita

Nesta abordagem a rede é dimensionada para oferecer a maior receita possível. Porém, quando se pensa em maximização de receita, algumas considerações são necessárias. Inicialmente, é preciso lembrar que a diferentes serviços associam-se distintos valores. A tarifação pode ser baseada em um valor fixo (mensal, por exemplo, como uma assinatura) ou então depender do tempo efetivo de utilização do serviço. Às vezes, uma combinação das duas formas é usada.

Por outro lado, a receita pode ser distribuída ao longo do período de tempo analisado. Neste caso, comparações com o custo (de implantação de equipamentos, de operação e manutenção, etc.) fazem mais sentido quando colocadas em uma mesma unidade de medida, como por exemplo, o “valor presente” ou algum tipo de “fluxo de caixa”.

Um problema que envolve maximização de receita tem, portanto, diferentes interpretações, a seguir são analisadas três dentre elas.

Maximização de Receita Respeitando um Limitante de Orçamento

Para maximizar a receita advinda da exploração dos serviços, é natural pensar que o atendimento pleno da demanda garante a máxima receita. Entretanto, isto em geral não é sempre possível. A pressão orçamentária não permite que sejam implantados equipamentos e rede suficientes para todos. Em outras palavras, parte da demanda pode ser sacrificada. Trata-se de atender seletivamente a demanda, visando a configuração que proporciona melhor receita nessas condições. Não se tenta mais garantir que toda a demanda seja atendida.

Nesta abordagem, o custo corresponde ao investimento realizado na rede, também chamado de Custo de Implantação (IFC). A receita pode ser totalizada em base mensal ou anual. Os valores de receita e custo não são comparáveis entre si; não há, portanto, necessidade de compatibilizar as unidades de medida de custo e receita.

Um modelo matemático desenvolvido a partir destas premissas deve ser capaz de contabilizar o custo e forçá-lo a obedecer ao orçamento (valor máximo permitido). Para o cálculo da receita, supõe-se que as demandas por cada serviço são perfeitamente conhecidas (ou pelo menos estimadas) em cada nó da rede. Como parte da demanda apresentada pode não ser atendida, é preciso lembrar que essa parcela não se reverte em receita.

Ainda um aspecto do cálculo de receita está sendo desprezado. De fato, o comportamento das tarifas costuma ser tal que o preço cai com o aumento do uso, em geral devido ao fato de que os equipamentos instalados estão em processo de amortização do investimento.

Maximização de Receita a Custo Mínimo

Outra abordagem prevê que receita e custo são dois objetivos distintos. Tanto o custo como a receita podem ser calculados de forma estática, como na abordagem descrita anteriormente. Entretanto, neste caso ambos os objetivos são perseguidos. Existe uma diferença fundamental com respeito ao custo, que não precisa respeitar um limite, mas sim ser minimizado.

Esta situação requer um tratamento multi-objetivos. O modelo é bastante similar àquele que será apresentado nos próximos capítulos. Entretanto, a presença de dois objetivos simultâneos requer outro método de resolução do problema matemático. Deve ser usada alguma das técnicas de Programação com Múltiplos Objetivos (PMO), (DEB, 2001). Embora exista certo apelo no fato de se tentar paralelamente minimizar o custo e maximizar a receita, na prática a complexidade do método exigido não costuma compensar o esforço dispendido. Os resultados obtidos com a abordagem anterior têm caráter bastante prático e parecem suficientes para a atividade de planejamento.

Maximização de Lucro

Neste caso, é preciso calcular a diferença entre receita e custo, a qual define o lucro. Assim, faz-se necessário compatibilizar as respectivas unidades de medida. Como uma possibilidade, pode-se trazer o custo para seu valor presente, usando métodos de matemática financeira. A receita também precisa ser calculada na mesma base.

Dependendo da quantidade disponível de informações, o modelo torna-se bastante complexo. É possível trabalhar com diversos estágios de planejamento (anos, semestres, meses). Os valores de custo e receita podem apresentar variações ao longo do tempo, devido ao barateamento da tecnologia, à redução de tarifas devido à maior penetração e/ou envelhecimento de um serviço, e assim por diante. Ao contrário da abordagem anterior, a maximização de lucro tem caráter dinâmico e, como tal, exige mais dados e maior tempo de processamento e análise.

Apesar de esta ser a abordagem mais realista para a questão da maximização de receita, a elevada complexidade torna-a menos atraente para implementação.

3.6 – ALOCAÇÃO E DIMENSIONAMENTO DE EQUIPAMENTOS

A alocação e o dimensionamento de equipamentos são tarefas bastante complexas. Em planejamento de redes essa atividade pode ser realizada de três formas distintas:

- Alocação sem uso de algoritmos heurísticos ou modelos matemáticos de otimização: neste caso o planejador deverá alocar e dimensionar os equipamentos em cada nó da rede. Para isso ele poderá utilizar uma ferramenta tipo calculadora que somente irá computar o custo dos equipamentos alocados nos nós. O planejador deverá conhecer as características técnicas de todos os equipamentos utilizados para cada solução tecnológica considerada. Deverão ser alocados/dimensionados equipamentos para o nó de estação, nó de acesso e nó de assinante.
- Alocação automatizada: depois de realizar o procedimento de alocação/dimensionamento várias vezes, o planejador poderá automatizar alguns ou todos os procedimentos necessários, utilizando algoritmos heurísticos. Tais algoritmos estarão totalmente ligados às características técnicas e funcionais de cada solução tecnológica considerada. Qualquer modificação nessas características poderá afetar diretamente o funcionamento dos algoritmos, gerando, portanto, a necessidade de atualizações, o que muitas vezes não é um procedimento trivial.
- Alocação utilizando modelos de otimização: esta é a forma mais sofisticada de resolver o problema. A principal tarefa do planejador é candidatar várias soluções tecnológicas. O modelo matemático irá procurar a solução que melhor atende os objetivos esperados pela empresa operadora. O procedimento de candidatar os equipamentos deve ser feito de forma manual ou automatizada. Neste último caso, algoritmos utilizando processos heurísticos também podem ser adotados.

3.7 – ANÁLISE ECONOMICA

Quando se realiza um planejamento, o estudo de caso traz duas informações básicas:

- Receita gerada pelos serviços oferecidos: a receita total gerada em cada estágio e também a receita por serviço;

- Custo das redes: em cada estágio do planejamento haverá um custo de implantação para cada solução tecnológica considerada, representando o investimento em equipamentos, cabos e infraestrutura.

Para realizar uma análise mais criteriosa sobre a viabilidade econômica de uma determinada tecnologia, deve-se considerar também os gastos com operação e manutenção do sistema ao longo do horizonte de planejamento. Porém, quanto mais recente a solução tecnológica, mais difícil será levantar estas informações.

De posse dos custos de implantação, operação e manutenção, da receita gerada em cada estágio de planejamento e ainda da taxa de retorno média anual mínima admitida é possível fazer uma análise econômica comparando as diferentes alternativas de investimento. Deve ser observado que a análise econômica não é um procedimento estático, ou seja, para a realização deste estudo deve-se, primeiramente, estipular um intervalo de vigência para o planejamento e contabilizar todos os custos ao longo deste período (PILÃO E HUMMEL, 2004).

Neste trabalho, o critério de otimização utilizado é o de minimizar o custo atendendo a demanda prevista. A análise econômica é uma atividade de pré-processamento, assim, ela não é uma variável de decisão do sistema de apoio à decisão.

CAPÍTULO 4

MODELOS MATEMÁTICOS

4.1 – INTRODUÇÃO

Este capítulo apresenta os modelos de Programação Linear Inteira Mista (PLIM), desenvolvidos para serem aplicados no planejamento da infraestrutura de sistemas de acesso móvel celular, para a seleção de serviços de telecomunicações e para implantação de uma rede *backbone* com várias demandas previstas. São utilizadas duas técnicas de modelagem, nó-arco e arco-caminho, em ambos os casos o modelo é o PLIM. 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, tarifa e de custos no item 4.5.

4.2 – MODELAGEM NÓ-ARCO – ALUGUEL DE REDE

O objetivo é alocar e dimensionar os equipamentos na rede de interconexão de ERBs e ao mesmo tempo buscar uma solução economicamente viável. A demanda a ser atendida em cada célula (ERB), o comprimento dos enlaces, as rotas alternativas para escoamento de demanda e as limitações de modularidade (capacidade) dos equipamentos SDH também fazem parte do processo de decisão. A estrutura de custos adotada no modelo considera os custos de aluguel de *links*. Este custo é dividido em duas parcelas: uma em função da capacidade do *link* SDH, a outra em função do comprimento do enlace. Os sistemas aqui podem ser formados por vários nós geradores de demanda (ERBs) e apenas um nó destino (CCC).

4.2.1 – REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DA REDE

O modelo de fluxo em rede (grafos) é utilizado para representar o problema de planeamento de rede. A Figura 8 representa este grafo e indica alguns elementos desta representação.

Nós de fontes

O grafo é orientado e os nós fontes (ERBs) são pontos concentradores e geradores de demanda (em canais E1) para o atendimento da demanda local. Estes nós devem estar fisicamente associados a um equipamento de transmissão SDH. Cada nó é identificado pelo número da fonte. Por exemplo, o nó fonte $[i]$ está associado a uma fonte qualquer de número $[i]$ e o nó destino está associado a um único destino (CCC). Esta modelagem também pode ser generalizada para um número maior de nós de destinos, embora este cenário não seja parte integrante deste trabalho.

Os nós fonte $[i]$ devem escoar toda a demanda gerada ou recebida de outros nós fonte, de forma que toda demanda prevista para ser atendida pelo sistema móvel celular chegue até o destino (CCC). A Figura 8 apresenta um exemplo de rede para aluguel.

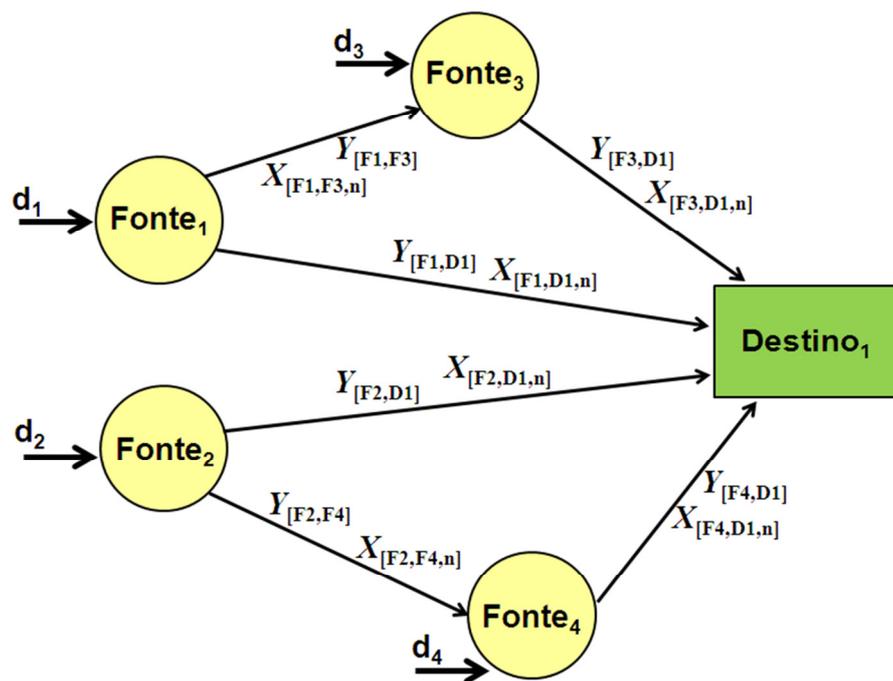


Figura 8 - Rede para aluguel.

Os principais elementos desta abordagem nó-arco são:

Arcos de Escoamento de Demanda

Os arcos de escoamento que ligam todos os nós fonte entre si e o destino são definidos por índices $[i, j]$, que representam respectivamente a origem $[i]$ e o destino $[j]$. O fluxo de demanda escoado por estes arcos é utilizado para definir a capacidade dos *links* de

transmissão a serem alugados da operadora de rede SDH. 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 escolha da capacidade de cada *link* está representada por uma variável de decisão binária como, por exemplo, $X_{[F2,D1,n]}$, que representa a escolha (ou não) de um sistema de transmissão de modularidade $[n]$ para ser alocado no *link* que conecta o nó fonte₂ (ERB₂) ao nó destino₁. A tecnologia SDH utilizando o modo de transmissão STM-1 (*Synchronous Transport Module level – modularidade [n]*), com taxa de transmissão de até 155,52 Mbps, permite quatro configurações de atendimento: 16xE1, 21xE1, 42xE1 e 63xE1 (Asga,2015). Embora a tecnologia SDH permita a implementação da topologia de atendimento em anel, a modelagem desenvolvida aqui contempla duas possibilidades de atendimento para os arcos de escoamento:

- Arcos diretos: arcos $[i, j]$ que ligam individualmente todas as fontes ao destino;
- Arcos indiretos: arcos $[i, j]$ que ligam os nós fontes entre si, formando assim rotas alternativas de atendimento.

Links Candidatos

O fluxo de demanda escoado pelos arcos da rede é utilizado para garantir o atendimento das necessidades de demanda da empresa contratante. O menor custo total de aluguel é o objetivo principal do modelo de otimização. Este custo depende da capacidade do *link* escolhido e das tarifas cobradas pelo aluguel dos sistemas de transmissão SDH e da rede ótica, os quais são diretamente influenciados pelo fluxo de demanda nestes arcos de escoamento. Esta escolha é feita através de variáveis de decisão reais, por exemplo, $Y_{[F4,D1]}$, que especificam a demanda que será escoada do nó fonte₄ (ERB₄) para o nó destino 1 (CCC₁).

4.2.2 – FORMULAÇÃO MATEMÁTICA

O modelo matemático utilizado é um problema de Programação Linear Inteira Mista (PLIM) que utiliza a abordagem nó-arco (BAZARAA et al., 2010). As variáveis de decisão do problema se referem a:

- Valor de fluxo de demanda escoado pelo arco: representado por Y_{ij} , onde Y indica a quantidade de canais E1 escoada pelo arco que liga a ERB $[i]$ à ERB $[j]$ ou à CCC $[j]$.

- Escolha (ou não) do arco para o escoamento da demanda prevista: representada por X_{ijn} , onde o valor de X (1 ou 0) indica se o *link* SDH de capacidade $[n]$ é ou não alocado no arco que liga a ERB $[i]$ à ERB $[j]$ ou à CCC $[j]$.

Função Objetivo (1): A função objetivo se refere ao custo mínimo gerado pelo aluguel da rede de interconexão SDH. É calculada somando-se os custos de aluguel de *link* escolhido para o escoamento da demanda dos nós de ERB, até o nó de CCC.

$$\text{Min} \sum_{[i,j] \in A_e} \sum_{[n] \in O_{SDH}} (c_n + r.l_{ij}) X_{ijn} \quad (1)$$

Onde:

A_e : conjunto de arcos de escoamento de demanda (diretos + indiretos), que ligam os nós de ERB $[i]$ aos nós de ERB $[j]$ ou ao nó de CCC $[j]$;

O_{SDH} : conjunto de modularidades (capacidades) dos *links* SDH candidatos nos arcos $[i,j] \in A_e$;

c_n : custo de aluguel do sistema de transmissão SDH de capacidade $[n] \in O_{SDH}$;

l_{ij} : comprimento do arco $[i, j] \in A_e$;

r : custo de aluguel de rede ótica (por km);

X_{ijn} : variável binária que representa a escolha do *link* SDH de capacidade $[n]$ candidato no arco $[i, j] \in A_e$.

Restrições de satisfação de demanda (2): as restrições de satisfação de demanda garantem o balanço de fluxo de demanda em todos os nós do grafo (ERBs), exceto para o nó da CCC, por ser uma equação redundante.

$$\sum_{[k,i] \in A_e} Y_{ki} - \sum_{[j,k] \in A_e} Y_{jk} = d_k \quad \forall k \in O_{ERB} \quad (2)$$

Onde:

O_{ERB} : conjunto de todos os nós de ERB da rede;

Y_{ki} : variável real que representa o fluxo de demanda atendido pelo arco $[k, i] \in A_e$, com a demanda saindo do nó $[k]$ e chegando em $[i]$;

Y_{jk} : variável real que representa o fluxo de demanda atendido pelo arco $[j, k] \in A_e$, com a demanda saindo do nó $[j]$ e chegando em $[k]$;

d_k : demanda prevista, em canais E1, para ser atendida em cada nó $[k] \in O_{ERB}$.

Restrições de capacidade técnica para a tecnologia SDH (3): as restrições de capacidade ocorrem em cada arco previsto pelo planejador para escoar a demanda das ERBs. Esta restrição assegura que a capacidade do *link* SDH escolhido seja capaz de atender a demanda escoada pelo arco.

$$\sum_{[n] \in O_{SDH}} Cap_{ij}^n X_{ijn} \geq Y_{ij}, \quad \forall [i, j] \in A_e \quad (3)$$

Onde:

Cap_{ij}^n : capacidade do *link* SDH de modularidade $[n]$ candidato no $[i, j] \in A_e$;

Y_{ij} : variável real que representa o fluxo de demanda atendido pelo arco $[i, j] \in A_e$.

Trabalhos utilizando esta modelagem, onde a operadora pretende interligar suas ERBS com a CCC através de *links* alugados de outra operadora de rede, são encontrados e discutidos com mais detalhes em DeOliveira et al., (2011).

4.3 – MODELAGEM NÓ-ARCO – CONTRATAÇÃO DE SERVIÇOS

O modelo matemático é desenvolvido para obter uma solução tecnológica mais adequada para atender diversos perfis de clientes em termos de demanda, custo e qualidade dos serviços corporativos de telecomunicações a serem contratados.

O objetivo principal é garantir os serviços solicitados e ao mesmo tempo buscar uma solução economicamente mais viável. A demanda a ser contratada de cada serviço, as soluções tecnológicas possíveis, as limitações técnicas de capacidade e os custos de implantação, manutenção e aluguel de equipamentos também fazem parte do processo de decisão.

4.3.1 – REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DA REDE

Os serviços contratados pela empresa devem ser atendidos por uma solução tecnológica candidata. Cada serviço possui uma demanda de forma que a solução tecnológica escolhida deve ser capaz de suprir o fluxo de todos os serviços contratados. A Figura 9 apresenta o diagrama de fluxo de demanda para os serviços a serem contratados por uma empresa.

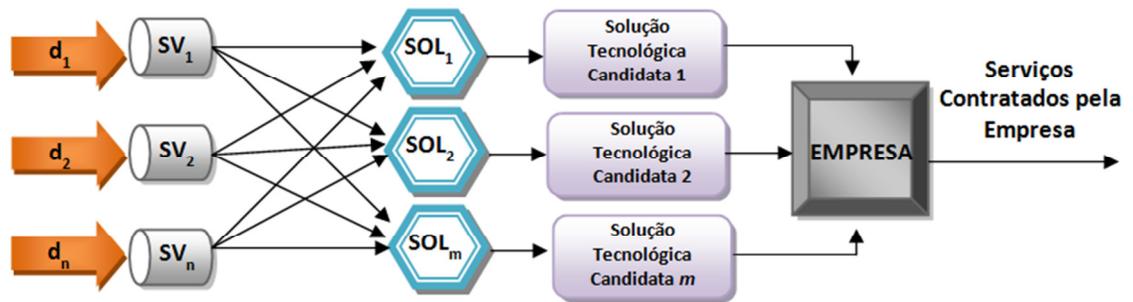


Figura 9 - Fluxo de demanda para os serviços a serem contratados.

Os principais elementos desta representação gráfica são:

Nós de Serviços (SV_n)

Os nós de serviços representam o ponto de concentração de saída/entrada da empresa. É o local onde é feita a conexão entre a empresa contratante e a operadora dos serviços.

Nós de Solução Tecnológica (SOL_m)

Cada nó de solução tecnológica é responsável pelo agrupamento das demandas de todos os serviços previstos para serem atendidos.

Nó de Empresa (EM)

O nó de empresa representa o cliente das operadoras de telecomunicações. As demandas dos nós de serviço a serem atendidas pela(s) operadoras representam o contrato de prestação de serviço para esta empresa. Nesta aplicação está sendo considerada a análise individualizada, ou seja, um contrato de cada vez.

Arcos de Escoamento de Demanda

Os arcos de escoamento que fazem a ligação entre os nós de serviços e os nós de solução tecnológica são definidos por índices $[i]$ e $[j]$, que representam, respectivamente, os nós serviços e os nós soluções tecnológicas. O fluxo de demanda escoado por estes arcos é utilizado para garantir o atendimento das necessidades da empresa contratante.

O menor custo total do contrato é o objetivo principal do modelo de otimização. Ele depende da solução tecnológica escolhida e das tarifas cobradas pelos serviços, os quais são diretamente influenciados pelo fluxo de demanda nestes arcos de escoamento.

Arcos de Solução Tecnológica Candidata

A solução adotada para a elaboração do modelo considera toda a planta disponibilizada pela operadora candidata. Outras soluções podem ser adotadas, desde que suas características tecnológicas atendam os requisitos necessários e sejam definidas pelo planejador.

4.3.2 – FORMULAÇÃO MATEMÁTICA

O modelo matemático formulado é um problema de Programação Linear Inteira Mista (PLIM) que utiliza a abordagem nó-arco (BAZARAA et al., 2010). O PLIM proposto aqui pode ser visto como uma adaptação do modelo apresentado no item anterior e apresenta a seguinte estrutura:

Função Objetivo (4): Se refere ao custo mínimo gerado pela aquisição ou locação e manutenção dos equipamentos, assim como custos de tarifas das operadoras. É calculada somando-se os custos de cada solução tecnológica e de tarifas para o escoamento da demanda dos nós de serviços, até o nó de empresa.

$$\text{Min} \sum_{(i,j) \in A_e} fid \cdot t_{ij} \cdot Y_{ij} + \sum_{(i,j) \in A_t} \sum_{k \in S_v} (CI_{ki} + CM_{ki}) \cdot X_{ijk} \quad (4)$$

Onde:

S_v : conjunto de todos os nós de serviço;

A_e : conjunto de arcos de escoamento de demanda, que ligam os nós de serviços $[i]$ aos nós de solução tecnológica $[j]$;

A_t : conjunto de arcos de solução tecnológica candidatas, que ligam os nós de solução tecnológica $[i]$ aos nós de empresa $[j]$;

fid : fator de fidelidade. Representa o número de períodos (em meses) de vigência do contrato;

Y_{ij} : variável real que representa o fluxo de demanda atendido pelo arco $[i,j] \in A_e$;

t_{ij} : tarifa unitária mensal no arco $[i, j]$. Representa a tarifa unitária para o serviço $[i]$, cobrada pela solução tecnológica $[j]$;

X_{ijk} : variável binária (1 ou 0) associada a cada solução tecnológica candidata, no arco $[i,j] \in A_t$, para atender o serviço $[k]$;

CI_{ki} : custo de implantação, da solução tecnológica $[i]$ para atender o serviço $[k]$;

CM_{ki} : custo de manutenção total em valor presente, da solução tecnológica $[i]$ para atender o serviço $[k]$.

Restrições de satisfação de demanda (5): As restrições de satisfação de demanda garantem o balanço de fluxo para todos os nós de serviço.

$$\sum_{(i,j) \in A_e} Y_{ij} = d_i, \forall i \in S_v \quad (5)$$

Onde:

d_i : demanda, especificada em minutos mensais, prevista para ser atendida em cada nó de serviço $[i] \in S_v$.

Restrições de capacidade (6): As restrições de capacidade asseguram que a capacidade das soluções tecnológicas candidatas seja capaz de atender a demanda prevista para cada serviço. Elas ocorrem em cada arco previsto pelo planejador para escoar a demanda.

$$\sum_{(i,j) \in A_t} Cap_{ki}^x \cdot X_{ijk} \geq Y_{ki}, \forall (k,i) \in A_e \quad (6)$$

Onde:

Y_{ki} : fluxo de demanda escoado do nó de serviço $[k]$ para o nó de solução tecnológica $[i]$;

Cap_{ki}^x : capacidade técnica da solução tecnológica $[i]$ para atendimento do serviço $[k]$.

Restrições de exclusividade (7): As restrições de exclusividade de atendimento são a garantia de que o modelo vai escolher uma única operadora para atender os serviços solicitados. As restrições (7) alocam as tecnologias Z para atender os serviços. A restrição (8) obriga a escolha de uma única solução tecnológica Z .

$$\sum_{k \in S_v} X_{ijk} \leq fcs \cdot Z_{ij}, \forall (i,j) \in A_t \quad (7)$$

$$\sum_{(i,j) \in A_t} Z_{ij} = 1 \quad (8)$$

Onde:

Z_{ij} : variável binária (1 ou 0) associada a cada solução tecnológica candidata, no arco $[i,j] \in A_t$, utilizada para garantir a exclusividade no atendimento;

fcs : fator de controle da solução tecnológica. Deve ser escolhido um valor alto para este parâmetro. Este parâmetro é utilizado para garantir que variável Z_{ij} seja igual a 1, quando algum X_{ijk} seja igual a 1.

4.4 – MODELAGEM ARCO-CAMINHO

Esta seção serve como referência para uma definição no problema de planejamento de redes utilizando a abordagem arco-caminho. A formulação arco-caminho abrange todos os problemas de projeto na versão atual do SNDlib (ORLOWSKI, 2010).

4.4.1 – REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DA REDE

O modelo de fluxo em rede (grafos) é utilizado para representar o problema de planejamento de rede. A Figura 10 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 serão associados um custo e a capacidade de transportar canais E1 (2,048 Mbps).

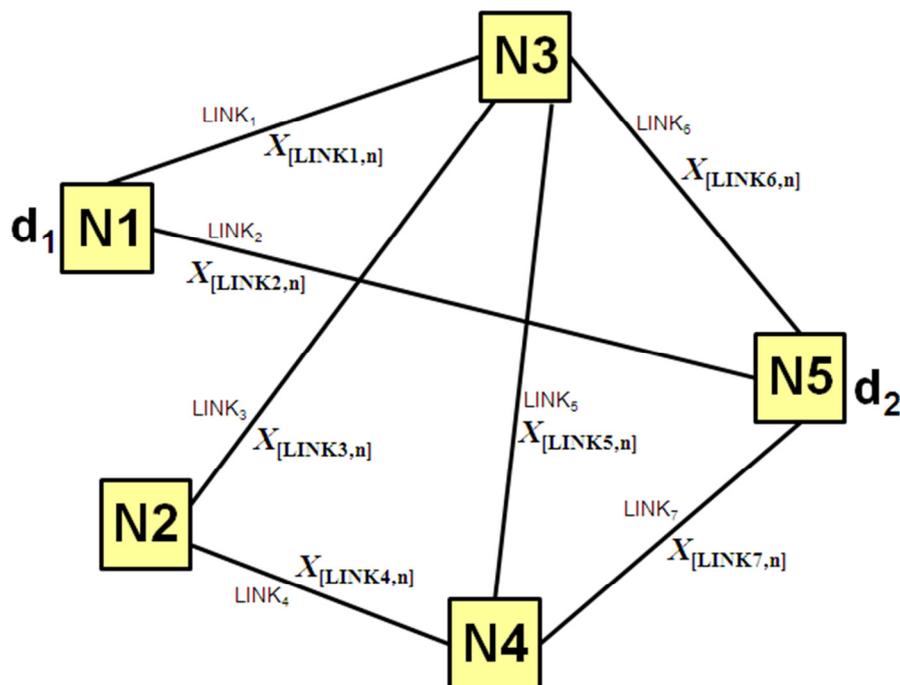


Figura 10 - Topologia rede arco-caminho.

Os principais elementos desta abordagem arco-caminho são:

Nós de Demanda

Os nós de demanda são pontos concentradores e geradores de demanda (em canais E1) 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 10 possui cinco nós de demanda.

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 em canais E1 para cada par de nós de demanda da rede, onde um nó representa o nó de origem da demanda e outro o nó de destino. Na rede exemplo estão indicados dois dados de demanda prevista:

d_1 : Demanda prevista para ser atendida entre o nó 1 e o nó 5;

d_2 : Demanda prevista para ser atendida entre o nó 5 e o nó 2.

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 2 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 escolha da capacidade de cada *link* está representada por uma variável de decisão binária como, por exemplo, $X_{[\text{LINK2},n]}$, 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 utiliza um ou mais caminhos distintos.

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 nó de destino. Para a rede exemplo da Figura 10, onde estão especificadas duas demandas, os

possíveis conjuntos de caminhos para atender as demandas d_1 e d_2 estão indicados na Tabela 01.

Tabela 1 - Escoamento da demanda.

<i>Demanda</i>	<i>Caminhos</i>	<i>LINKs</i>
d_1	P_1	LINK2
	P_2	LINK1 → LINK6
d_2	P_3	LINK7 → LINK4
	P_4	LINK6 → LINK3
	P_5	LINK6 → LINK5 → LINK4

A Tabela 01 indica que uma parcela da demanda d_1 pode ser escoada por um caminho P_1 e outra parcela dessa mesma demanda por um caminho P_2 diferente do primeiro. Esta escolha é feita através de variáveis de decisão reais $Y_{[\text{caminho}, \text{demanda}]}$, que especificam a parcela da demanda (por exemplo d_1), que será escoada pelo caminho (por exemplo P_1).

4.4.2 – FORMULAÇÃO MATEMÁTICA

O modelo desenvolvido é um problema de Programação Linear Inteira Mista que utiliza a abordagem arco-caminho (Bazaraa et al., 2010) e utiliza como ponto de partida o trabalho desenvolvido em Madronero et al. (2012) e Peidro et al. (2010). As variáveis de decisão do problema referem-se a:

- Valor do fluxo de demanda escoado por um caminho para atender uma demanda especificada: Y_{jk} , onde Y indica a quantidade de canais E1 escoada pelo caminho $[j]$ para atender a demanda $[k]$;
- Escolha (ou não) de um *link*: X_{in} , onde o valor de X (1 ou 0) indica se o *link* $[i]$ de capacidade $[n]$ é ou não escolhido para ser alocado;
- Carregamento (ocupação) máximo de um *link*: W_i , onde W indica a quantidade máxima de canais E1 escoada por um *link* $[i]$;
- Capacidade máxima de um *link*: Z_i , onde Z indica a quantidade máxima de canais E1 que um *link* $[i]$ suporta.

Função Objetivo (9): A função objetivo se refere ao custo mínimo gerado pela implantação da rede. É calculada somando-se os custos dos sistemas de transmissão escolhidos para o escoamento da demanda entre os nós de demanda. O produto $c_{in}X_{in}$ contabiliza este custo

quando a variável X assume valor 1.

$$\text{Min} \sum_{[i] \in \text{LINK}} \sum_{[n] \in \text{O}_{\text{LINK}}} c_{in} X_{in} \quad (9)$$

Onde:

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

O_{LINK} : conjunto de modularidades (capacidades) $[n]$ dos sistemas de transmissão candidatos nos *links* $[i] \in \text{LINK}$;

C_{in} : custo do sistema de transmissão de capacidade $[n] \in \text{O}_{\text{SDH}}$, candidato no *link* $[i] \in \text{LINK}$;

X_{in} : variável binária que representa a escolha do sistema de transmissão de capacidade $[n]$, candidato no *link* $[i] \in \text{LINK}$.

Restrições de balanço de demanda (10): As restrições de balanço de demanda garantem que o somatório dos fluxos de demanda dos caminhos que atendem uma determinada demanda deve ser igual ao valor previsto para esta demanda. A expressão a seguir é utilizada para fazer este controle para cada demanda prevista na rede.

$$\sum_{[j] \in P_k} Y_{jk} = d_k \quad \forall k \in \text{DEM} \quad (10)$$

Onde:

DEM: conjunto formado por todas as demanda previstas para serem atendidas pela rede;

P_k : conjunto de caminhos que atendem a demanda $[k] \in \text{DEM}$;

Y_{jk} : variável real que representa a parcela da demanda $[k] \in \text{DEM}$, atendida pelo caminho $[j] \in P_k$;

d_k : demanda $[k]$ prevista, em canais E1, para ser atendida entre dois nós de demanda da rede.

Restrições de capacidade técnica: As restrições de capacidade ocorrem em cada *link* previsto pelo planejador para o escoamento das demandas. Elas garantem que a capacidade do sistema de transmissão alocado num *link* é suficiente para escoar a demanda que passa por este *link*. Estas restrições estão desmembradas em quatro partes: a primeira (11) calcula o carregamento (a ocupação) de demanda no *link*; a segunda (12) calcula a capacidade total do *link*, somando

as capacidades de cada sistema candidato; a terceira (13) garante que a capacidade do *link* candidato é maior (no mínimo igual) que o fluxo de demanda que passa pelo *link*, ou seja, a diferença entre a capacidade e o fluxo no *link* gera uma folga na rede; a quarta (14) garante que apenas um sistema de transmissão deve ser alocado cada *link*.

$$\sum_{[j,k] \in \Omega_i} Y_{jk} = W_i, \quad \forall [i] \in \text{LINK} \quad (11)$$

$$Z_i = \sum_{[n] \in O_{\text{LINK}}} \text{Cap}_n X_n, \quad \forall [i] \in \text{LINK} \quad (12)$$

$$W_i \leq Z_i, \quad \forall [i] \in \text{LINK} \quad (13)$$

$$\sum_{[n] \in O_{\text{LINK}}} X_n \leq 1, \quad \forall [i] \in \text{LINK} \quad (14)$$

Onde:

Ω_i : conjunto formado por todos os caminhos que necessitam utilizar o *link* $[i]$ para escoar o fluxo de demanda;

W_i : variável real que contabiliza o carregamento (a ocupação) do *link* $[i] \in \text{LINK}$;

Z_i : variável real que contabiliza a capacidade total do *link* $[i] \in \text{LINK}$;

Cap_n : capacidade do sistema de transmissão, de modularidade $[n]$.

4.5– MODELAGEM DOS DADOS IMPRECISOS

A demanda prevista para ser atendida, a tarifa unitária a ser cobrada por um serviço e o custo de alocação de facilidades (custo de implantação ou de aluguel) são parâmetros difíceis de serem estimados com precisão. Eles podem ser influenciados 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 destes fatores afeta o dimensionamento da rede, estes se tornam pontos cruciais 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* ou multi-níveis. 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, tarifa e custo.

4.5.1 – MODELAGEM PARA A ABORDAGEM NÓ-ARCO

As principais adaptações acontecem no parâmetro que mede o valor de demanda, d_i , das equações (2) e (5) e também nos parâmetros cn e fid das funções objetivo (1) e (4), respectivamente.

Restrições de demanda: A cada um dos valores de demanda dos serviços é associado um número *fuzzy* $\tilde{d}_i = (\underline{d}_{\min_i}, D_{\text{méd}_i}, \bar{d}_{\max_i})$, definido como o conjunto dos valores possíveis para a demanda do serviço [i] a ser atendida pela solução tecnológica. É adotada uma função de pertinência triangular, apresentada na Figura 11.

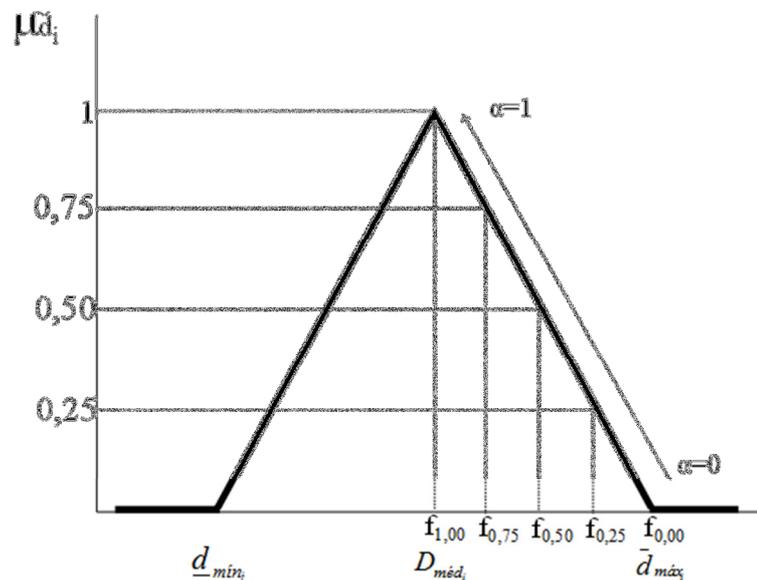


Figura 11 - Modelagem triangular para demanda – Função de pertinência.

Onde:

\tilde{d}_i : demanda *fuzzy* do serviço [i], prevista para ser atendida;

\underline{d}_{\min_i} : demanda mínima do serviço [i], prevista para ser atendida;

$D_{\text{méd}_i}$: demanda média do serviço [i], prevista para ser atendida. Representa o valor de maior pertinência do número *fuzzy* triangular;

\bar{d}_{\max_i} : demanda máxima do serviço [i], prevista para ser atendida.

A função paramétrica adotada para a determinação do equivalente do número *fuzzy* é a Função de Adamo (15) (CAMPOS E VERDEGAY, 1989):

$$f_a(\tilde{d}_i) = \max \left\{ \tilde{d}_i \mid \mu_{\tilde{d}_i}(d_i) \geq \alpha \right\}, \alpha \in [0,1] \quad (15)$$

A aplicação do equivalente de Adamo para a demanda *fuzzy* triangular resulta em (16):

(16)

$$f_a(\tilde{d}_i) = D_{méd_i} + (\bar{d}_{máx_i} - D_{méd_i}) \cdot (1 - \alpha)$$

O número *fuzzy* é reduzido a um intervalo do qual se toma o limitante superior como valor de trabalho. O parâmetro α indica o grau de confiança nos valores de demanda a adotar. A Figura 11 mostra o funcionamento do equivalente de Adamo para um número *fuzzy* triangular. A variação do parâmetro α permite fazer uma análise técnico-econômica para diferentes possibilidades de demanda prevista para cada serviço. De posse dos dados de demanda dos serviços, a operadora é capaz de estimar os respectivos níveis de valores de tarifa unitária, de acordo com sua política econômica de incentivos e de fidelização. Deve ser observado que à medida que se aumenta o grau de confiança ($\alpha=0 \rightarrow \alpha=1$) os valores das demandas previstas diminuem, com $d_i = \bar{d}_{máx_i} \rightarrow D_{méd_i}$. Uma deficiência da técnica é que ela não avalia o intervalo $\underline{d}_{mín_i} \rightarrow \bar{d}_{máx_i}$.

Função Objetivo: As duas funções objetivo avaliadas contabilizam o custo do sistema dimensionado, seja custo de aluguel de rede ou tarifa unitária cobrada pelo oferecimento de um serviço. A modelagem dos dados imprecisos é feita de duas formas:

Modelagem Fuzzy: A técnica é a mesma apresentada para as restrições de demanda. A cada valor de custo é associado um número *fuzzy* triangular $\tilde{c}_n = (\underline{c}_{mín_n}, C_{méd_n}, \bar{c}_{máx_n})$, definido como o conjunto dos valores possíveis para o custo do sistema.

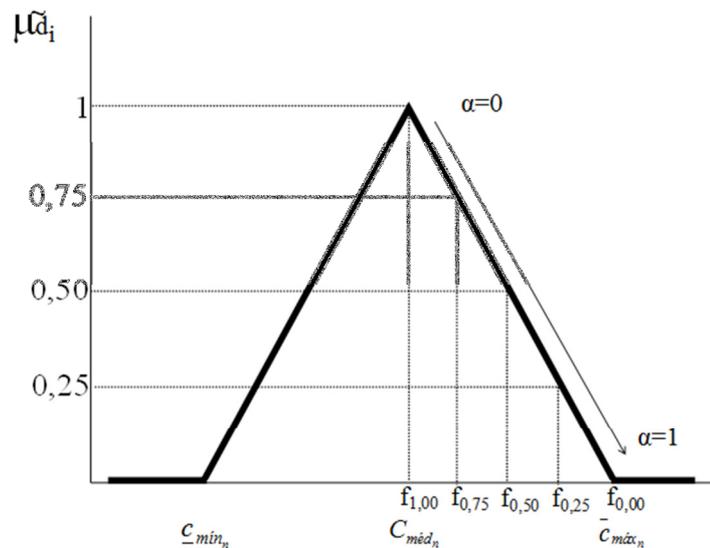


Figura 12 - Modelagem triangular para custo – Função de pertinência.

Para contemplar o ganho de escala entre as modularidades dos sistemas candidatos, a medida que o grau de confiança (α) diminui, demandas maiores, o custo unitário deve diminuir (DeSousa, 2010). Esta análise pode ser conferida na Figura 12.

Modelagem Multi-Níveis: Uma situação bastante razoável encontrada no ambiente das operadoras de sistemas de telecomunicações é que normalmente as mudanças nas tarifas ocorrem em momentos pontuais, quando o atendimento alcança patamares que justifiquem tais adequações. De forma a contemplar esta estratégia mercadológica, os dados de tarifa unitária também são com a proposta de dois α -cortes especificados através de um modelo de faixas de valores, conforme indicado na Figura 13.

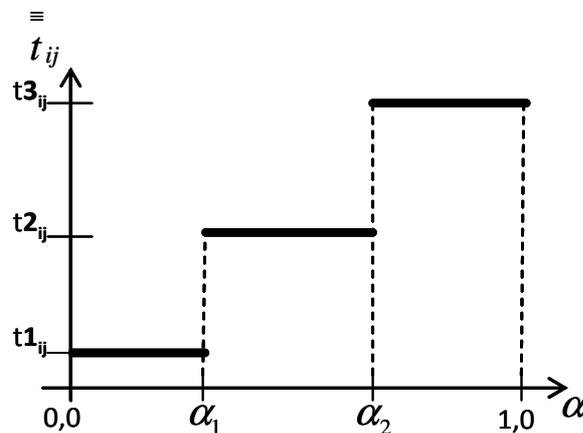


Figura 13 - Modelagem Multi-níveis.

Esta modelagem permite à operadora ajustar a sua tarifa unitária de acordo com a demanda prevista para ser atendida, permitindo ganho de escala para a empresa contratante, conforme a sua demanda *fuzzy* cresce ($\alpha \rightarrow 0$, na Figura 11). Uma aplicação desta modelagem está descrita no Capítulo 5 no item 5.2.

4.5.2 – MODELAGEM PARA A ABORDAGEM ARCO-CAMINHO

As principais adaptações acontecem no parâmetro que mede o valor de demanda, d_k , da equação (10) e também no parâmetro custo C_{in} da função objetivo (9). A técnica de resolução escolhida baseia-se nos trabalhos de Madronero et al. (2012), Peidro et al. (2010) e

Sharma (2011), que utilizam a técnica para resolver outros tipos de problemas, como por exemplo os de transportes.

Restrições de demanda: A cada uma das demandas das (d_k), dos custos de enlace SDH (C_{in}) foi associado um número *fuzzy*: e que definem o intervalo de variação do dado. A função de pertinência trapezoidal simétrica é apresentada na Figura 14. O valor médio (V_m) representa o valor de maior pertinência.

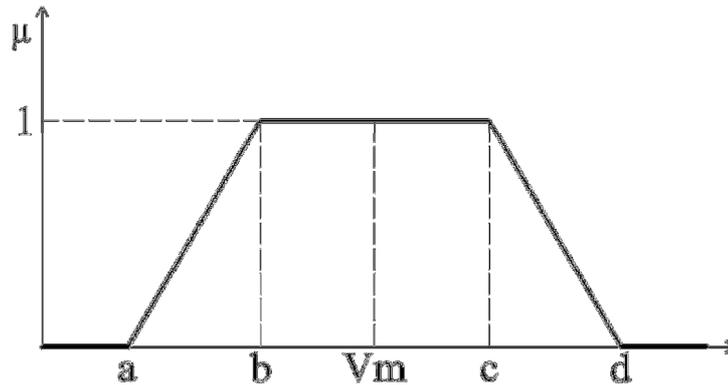


Figura 14 - Modelagem trapezoidal – Função de pertinência.

As restrições de demanda são (17) e (18):

$$\sum_{[k,i] \in A_e} Y_{ki} - \sum_{[j,k] \in A_e} Y_{jk} \leq \frac{\alpha}{2} \cdot \frac{d_{ka} + d_{kb}}{2} + \left(1 - \frac{\alpha}{2}\right) \cdot \frac{d_{kc} + d_{kd}}{2} \quad \forall k \in O_{\text{ERB}} \quad (17)$$

$$\sum_{[k,i] \in A_e} Y_{ki} - \sum_{[j,k] \in A_e} Y_{jk} \geq \frac{\alpha}{2} \cdot \frac{d_{kc} + d_{kd}}{2} + \left(1 - \frac{\alpha}{2}\right) \cdot \frac{d_{ka} + d_{kb}}{2} \quad \forall k \in O_{\text{ERB}} \quad (18)$$

Para utilizar o número *fuzzy* nas simulações é necessário transformá-lo em um número *crisp*. A presença de números *fuzzy* nas restrições do MILP pode alterar substancialmente o seu procedimento de resolução. Há 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 várias técnicas para defuzzificação (PEDRYCZ et al., 1998). 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*. O método consiste em obter um número *crisp* a partir de uma função de parametrização, na qual um

fator de confiança, α , 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.

Função Objetivo: Na função objetivo (19), a defuzzificação do parâmetro custo é feito considerando a função “valor esperado” para um número *fuzzy* trapezoidal.

$$\text{Min} \sum_{[i,j] \in A_e} \sum_{[n] \in O_{SDH}} \left(\frac{c_{na} + c_{nb} + c_{nc} + c_{nd}}{4} + r.l_{ij} \right) X_{ijn} \quad (19)$$

A medida que o fator de confiança, α , aproxima-se de 1, o intervalo de demanda previsto diminui. Com $\alpha = 1$, o termo independente dos conjuntos de restrições (17) e (18) alcançam o mesmo valor V_m (Figura 14). A Figura 15 apresenta o comportamento da curva de defuzzificação, indicando o valor mínimo e máximo ($\alpha=0$) e o valor médio ($\alpha=1$). Como o problema em estudo trata de minimização, a variação do parâmetro α permite analisar o sistema partindo dos valores extremos de demanda d_{\min} e d_{\max} ($\alpha=0$), que representa o maior intervalo de imprecisão, até a demanda média (V_m), com $\alpha=1$, sem intervalo de imprecisão.

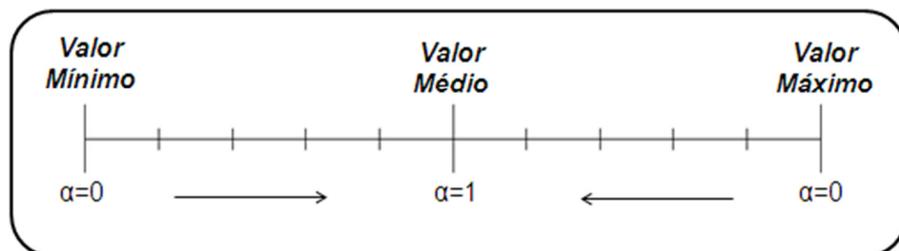


Figura 15 - Curva de defuzzificação.

A teoria e as técnicas computacionais para análise paramétrica de problemas 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 α . A aplicação desta modelagem para valores discretos do parâmetro α está descrita no Capítulo 5 no item 5.3.

CAPÍTULO 5

RESULTADOS

5.1 – INTRODUÇÃO

Este capítulo apresenta e discute os resultados computacionais oriundos da aplicação da metodologia de planejamento discutida no capítulo anterior, onde são apresentadas aplicações do modelo nó-arco para seleção de serviços de telecomunicações e do modelo arco-caminho para a implantação de uma rede *backbone* com demandas previstas.

A Seção 5.2 é dedicada ao modelo de seleção de serviços em telecomunicações. Trata-se da aplicação do modelo C5-1. Este modelo permite avaliar contratos de fidelização na prestação de serviços corporativos de telecomunicações. A análise técnico-econômica é feita utilizando um modelo de programação linear inteira mista capaz de acomodar dados imprecisos para a demanda e a tarifa dos serviços.

A aplicação do modelo arco-caminho para implantação de uma rede *backbone* encontra-se na Seção 5.3. O modelo C5-2 é o resultado da modelagem da abordagem arco-caminho com a introdução da imprecisão para tornar o modelo mais flexível. Uma instância da biblioteca SNDlib é utilizada como cenário de aplicação.

5.2 – APLICAÇÃO DO MODELO NÓ-ARCO - CONTRATAÇÃO DE SERVIÇOS

Os serviços contratados pela empresa devem ser atendidos por uma solução tecnológica candidata. Cada serviço possui uma demanda de forma que a solução tecnológica escolhida deve ser capaz de suprir o fluxo de todos os serviços contratados. O modelo permite avaliar a escolha da solução tecnológica mais viável, economicamente, a partir de dados imprecisos de demanda. A ferramenta computacional trata os dados de demanda prevista através dos conceitos de números *fuzzy* com a função de pertinência triangular, enquanto a tarifa unitária variável é modelada por meio de ajuste multi-nível. Além disso, serão utilizados critérios de exclusividade para que o modelo possa escolher apenas uma prestadora de serviços. O método do Valor Presente – VP (PILÃO e HUMMEL, 2004) é utilizado para

avaliar os custos de manutenção dos serviços, diante de contratos de fidelização realizados entre o cliente e a operadora contratada. O estudo apresentado a seguir pode ser conferido em DeSousa et al., (2014).

5.2.1 – SERVIÇOS CORPORATIVOS E SOLUÇÕES TECNOLÓGICAS

A integração dos serviços de telefonia com a rede privada e pública de dados abrem possibilidades de comunicação mais abrangentes, tanto em termos geográficos de novos serviços, como de novas tecnologias. As centrais telefônicas digitais, com o advento do microcomputador, trouxeram flexibilidade, confiabilidade, diminuição de tamanho, modularidade, economia no consumo de energia e facilidade na incorporação de novos serviços de telecomunicações. Tornou possível a integração entre a transmissão digital e a comutação digital. Na realidade, essa integração foi um grande passo para evoluir na direção da RDSI (Rede Digital de Serviços Integrados – ISDN - *Integrated Services Digital Network*) (JESZENSKY, 2004). O objetivo dessa rede é integrar vários tipos de serviços, como voz e transmissão de dados, em uma única rede para melhor aproveitar os seus recursos operacionais.

Comprova-se uma introdução crescente de diferentes soluções de voz (VoIP – Voz sobre protocolo internet, por exemplo) e dados, que visam inicialmente a troca de informações inter e intra-redes, via os canais de dados existentes nas redes corporativas. Seguindo esta tendência, as empresas operadoras do setor de telecomunicações provêm, basicamente, quatro tipos de serviços para o ambiente corporativo, caracterizados pela forma como a informação é apresentada ao usuário: voz, dados e imagens, vídeo e multimídia.

Para garantir serviços de voz e dados de qualidade, as operadoras de telecomunicações disponibilizam uma plataforma tecnológica diversificada: sistemas de comutação de alto desempenho (centrais telefônicas digitais, roteadores, entre outros), servidores de dados, sistemas de transmissão (modems, fibras ópticas, sistemas de micro-ondas) e equipamentos terminais (telefones fixos e móveis, terminais de dados, etc.), propiciando, assim, facilidades diversificadas aos clientes, independente do tipo de serviço solicitado.

5.2.2 – O MODELO NÓ-ARCO UTILIZADO

A modelagem nó-arco utilizada é o Modelo C5-1 que teve como ponto de partida DeSousa et al., (2014). O Modelo C5-1 já foi detalhado no Capítulo 4, e está reescrito a seguir para facilitar a análise dos cenários estudados.

Modelo C5-1

Função Objetivo:

$$\text{Min} \sum_{[i,j] \in A_s} \text{fid} \cdot t_{ij} \cdot Y_{ij} + \sum_{[i,j] \in A_t} \sum_{k \in S_v} (CI_{ki} + CM_{ki}) \cdot X_{ijk}$$

Restrições:

$$\sum_{[i,j] \in A_s} Y_{ij} = D_{\text{méd}_i} + (\bar{d}_{\text{máx}_i} - D_{\text{méd}_i}) \cdot (1 - \alpha), \forall i \in S_v$$

$$\sum_{[i,j] \in A_t} \text{Cap}_{ki}^X \cdot X_{ijk} \geq Y_{ki}, \forall [k,i] \in A_s$$

$$\sum_{k \in S_v} X_{ijk} \leq \text{fcs} \cdot Z_{ij}, \forall [i,j] \in A_t$$

$$\sum_{[i,j] \in A_t} Z_{ij} = 1$$

Para a simulação do Modelo C5-1 foram utilizados os seguintes recursos computacionais: a linguagem de programação matemática AMPL® (FOURER et al., 2002 e AMPL, 2010), para a elaboração do modelo matemático, e o pacote de otimização CPLEX® (CPLEX, 2008) para sua resolução, ambos manipulados em microcomputadores no ambiente Windows 7®. A Figura 16 apresenta os procedimentos computacionais para a resolução do modelo.

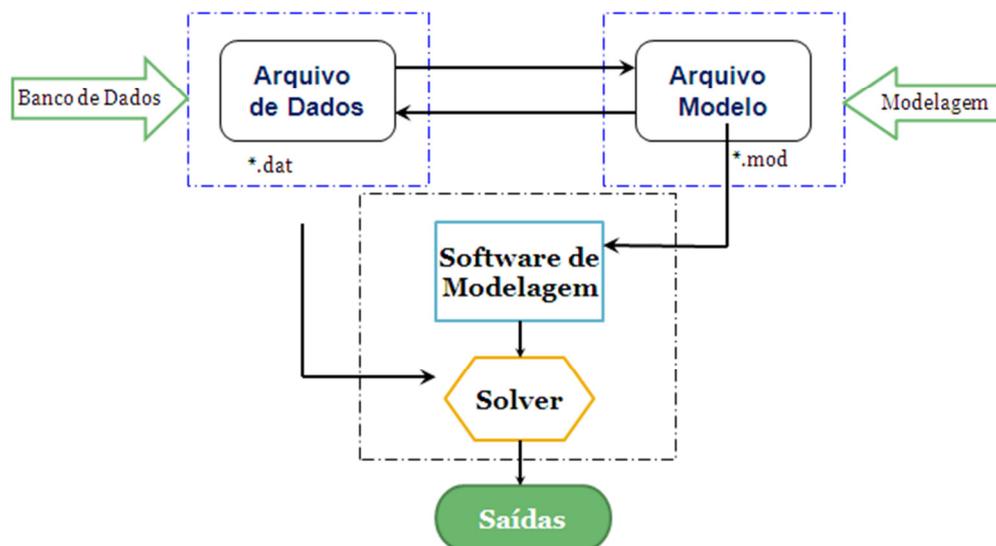


Figura 16 - Procedimentos computacionais.

É elaborado um arquivo de dados, onde são declarados parâmetros do modelo e um arquivo modelo, onde são declaradas a função objetivo e restrições do modelo de programação linear. Esses arquivos são implementados na linguagem de programação matemática AMPL®, que é uma ferramenta de modelagem sofisticada, porém é de fácil utilização. Após a implementação dos arquivos de dados e modelo, eles são carregados no software juntamente com o *solver* CPLEX® e após na saída temos os resultados. O tempo para obtenção das soluções dos modelos apresentados ficou na ordem de segundos. Modelos manipulados em microcomputador com ambiente Windows XP®, processador Intel Core 2 Duo 2.10GHz e memória RAM de 4GB.

Uma vez que a análise envolve valores monetários, comparação de custos, taxas de juros e preços tarifários em instantes de tempo diferentes, faz-se necessário o uso de uma técnica de análise conhecida como Engenharia Econômica. Para a modelagem são necessários conhecimentos prévios dessa técnica, dos serviços contemplados e das plataformas tecnológicas escolhidas.

Engenharia Econômica: Inicialmente, é preciso lembrar que a diferentes serviços associam-se distintos valores. A tarifação pode ser baseada em um valor fixo (mensal, por exemplo, como uma assinatura) ou então depender do tempo efetivo de utilização do serviço. Às vezes, uma combinação das duas formas é usada. Por outro lado, a receita pode ser distribuída ao longo do período de tempo analisado. Neste caso, comparações com o custo (de implantação de equipamentos, de operação e manutenção, etc.) fazem mais sentido quando colocadas em uma mesma unidade de medida. Como uma possibilidade, pode-se “trazer” o custo para seu valor presente, usando métodos de Matemática Financeira. As tarifas também precisam ser calculadas na mesma base de tempo. Portanto, quando se desenvolve um planejamento estagiado, o estudo de caso traz duas informações básicas:

- *Receita (ou tarifa) gerada pelos serviços oferecidos:* a receita total gerada em cada estágio e também a receita por serviço;
- *Custo das redes:* em cada estágio do planejamento haverá um custo de implantação (ou manutenção) para cada solução tecnológica considerada, representando o investimento em equipamentos, cabos e infraestrutura.

Porém, quanto mais recente a solução tecnológica, mais difícil será levantar estas informações. Uma maneira de simplificar o problema é supor que o custo de manutenção representa uma parcela do custo de implantação da rede.

De posse dos custos de implantação, operação e manutenção, da receita (ou tarifa) gerada em cada estágio de planejamento e ainda da taxa de retorno média anual mínima admitida (taxa de atratividade do investimento) é possível fazer uma análise econômica comparando as diferentes alternativas de investimento. Essa análise pode ser feita utilizando diferentes métodos, dentre eles o VP, que é o método adotado (PILÃO E HUMMEL, 2004). A característica essencial deste método é a análise das diferentes alternativas de investimento usando, para efeito de comparação, o valor presente equivalente a cada um dos fluxos de caixa representativos de cada alternativa considerada. Portanto, deve ser observado que a análise econômica não é um procedimento estático, ou seja, para a realização deste estudo deve-se, primeiramente, estipular um intervalo de vigência para o planejamento (como por exemplo, contrato de fidelidade) e contabilizar todos os "custos" ao longo deste período.

Serviços: Os serviços utilizados no modelo necessitam de informações referentes à transmissão de dados e voz, quantidade de canais de interconexão E1 – *link* de acesso entre a operadora de telecomunicações e a empresa contratante – com taxa de transmissão de 2,048 Mbps. As tarifas de aluguel e utilização também devem ser conhecidas.

Equipamentos: Mesmo especificando a tecnologia, existe a necessidade de equipamentos para o fornecimento dos serviços. Dados como a capacidade, o valor referente ao custo de implantação dos aparelhos e os valores de manutenção, durante a vigência do contrato, se tornam necessário.

5.2.3 – AVALIAÇÃO TÉCNICO-ECONÔMICA

Três serviços foram considerados na avaliação: voz convencional (*SV01*), transmissão de dados (*SV02*) e VoIP (*SV03*). Três contratos de prestação de serviços foram avaliados:

Contrato 1: A operadora A fornece todos os equipamentos utilizados, bem como os *links* de acesso E1, tanto para dados quanto para voz.

Contrato 2: A operadora B fornece os *links* de acesso E1. Porém, os equipamentos devem ser adquiridos separadamente pela empresa contratante.

Contrato 3: A operadora C disponibiliza a mesma plataforma tecnológica da operadora A, mas com tarifas e custos diferenciados.

Nas três operadoras, durante o contrato de fidelização, as tarifas de manutenção e mensalidade são reajustadas anualmente, conforme a variação do IST (Índice de Serviços de

Telecomunicações), que é um índice composto pelos principais itens de despesa dos serviços de telecomunicações (ANATEL, 2014). Já as tarifas unitárias dos serviços não sofrem reajustes durante o período de fidelização. A análise não considera, para efeitos de cálculo, os custos de atualização tecnológica e depreciação dos equipamentos. Os dados utilizados refletem a realidade e foram obtidos por empresas de serviços de telecomunicações. A função de pertinência utilizada é a triangular, descrita no Capítulo 4.

5.2.4 – CENÁRIOS ESTUDADOS

Embora a modelagem matemática proposta possa ser configurada para trabalhar com diversas alternativas de contratação de serviços, nesta aplicação é avaliado o impacto na configuração de atendimento causado pela demanda *fuzzy* (e tarifa ajustável) e pelo prazo de fidelização. A Tabela 2 apresenta a demanda prevista *fuzzy* (mensal, em minutos) dos serviços a serem contratados.

Tabela 2 - Valores de demanda prevista – número *fuzzy* triangular (em minutos).

<i>Serviço</i>	<i>Demanda Mínima</i>	<i>Demanda Média</i>	<i>Demanda Máxima</i>
<i>SV01</i>	22.400	28.000	37.800
<i>SV02</i>	18.400	23.000	27.600
<i>SV03</i>	14.400	18.000	27.000

Na Tabela 3 estão indicados os custos de instalação e de manutenção em cada operadora candidata. Os custos de manutenção indicados já estão todos convertidos para o valor presente, de acordo com o IST (ANATEL, 2014). O VP encontrado após o cálculo não representa o custo imediato com a manutenção. Esse valor é usado de forma a permitir o seu confronto com os custos de instalação e de tarifas, dentro do prazo de fidelização, entre as três propostas de contrato de fidelização.

Tabela 3 - Custos de manutenção e instalação convertidos em VP.

<i>Custo (R\$)</i>	<i>Operadora A Contrato 1</i>	<i>Operadora B Contrato 2</i>	<i>Operadora C Contrato 3</i>
<i>Instalação (x1000)</i>	2,25	220,00	2,25
<i>Manutenção (x1000)</i>	37,20	18,60	31,50

Esse valor é usado de forma a permitir o seu confronto com os custos de instalação e de tarifas, dentro do prazo de fidelização, entre as três propostas de contrato de fidelização. A Figura 17 apresenta os valores estimados para a tarifa dos serviços nas operadoras candidatas com os seus respectivos níveis de mudança de faixa (α -cortes).

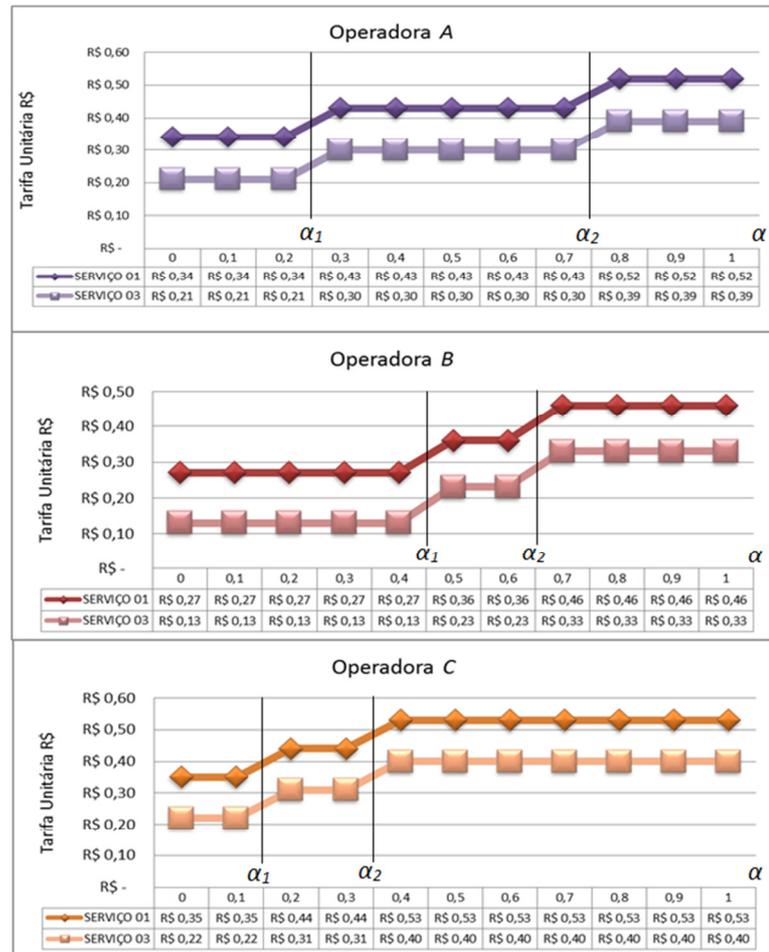


Figura 17 - Níveis de tarifas para cada serviço, em cada operadora, com seus pontos de ajuste, α_1 e α_2 .

O serviço SV02 (transmissão de dados) não possui tarifa por tempo de utilização (por minuto). Esta modelagem multi-níveis permite um ganho de escala para a empresa contratante, pois o valor da tarifa altera conforme a demanda *fuzzy* cresce (Tabela 2).

5.2.5 – RESULTADOS OBTIDOS

O objetivo é averiguar a configuração de atendimento diante de mudanças nos valores de demanda e de tarifa unitária dos serviços, ou seja, qual contrato escolher e os valores de orçamento durante o seu prazo de vigência são algumas das respostas esperadas. A Tabela 4

lista, para cada período de fidelização em análise, a escolha adequada da operadora de acordo com a confiança nos dados de demanda dos serviços, onde $\alpha=1$ representa o maior grau de confiança.

Tabela 4 - Operadoras escolhidas em função do α nos dados de demanda.

<i>Alfa de Adamo</i>	<i>24 meses</i>	<i>36 meses</i>	<i>48 meses</i>
<i>0.0</i>	Oper. A	Oper. B	Oper. B
<i>0.1</i>	Oper. A	Oper. B	Oper. B
<i>0.2</i>	Oper. A	Oper. B	Oper. B
<i>0.3</i>	Oper. B	Oper. B	Oper. B
<i>0.4</i>	Oper. B	Oper. B	Oper. B
<i>0.5</i>	Oper. A	Oper. A	Oper. B
<i>0.6</i>	Oper. A	Oper. A	Oper. B
<i>0.7</i>	Oper. A	Oper. A	Oper. A
<i>0.8</i>	Oper. A	Oper. A	Oper. A
<i>0.9</i>	Oper. A	Oper. A	Oper. A
<i>1.0</i>	Oper. C	Oper. C	Oper. C

Para o cenário em que se tem o maior grau de confiança nos dados de demanda ($\alpha=1$), a operadora *C* foi escolhida nos dois estudos, para os três períodos de fidelização. Este comportamento dos resultados mostra que a proposta da operadora *C* é a que apresenta maiores possibilidades de ser contratada.

A medida que o grau de certeza nos dados de demanda diminui, os resultados mostram que a política de atuação no mercado com a receita unitária modelada em multi-níveis permite uma maior competitividade entre as operadoras *A* e *B*, para os contratos de fidelização de 24 e 36 meses. Para o contrato de fidelização de 48 meses, a operadora *B* mostrou-se a mais competitiva na maioria dos cenários de demanda. Em contrapartida, a escolha fica entre a operadora *A* e a operadora *C* para aquelas situações de maior confiança nos dados de demanda.

A Figura 18 representa o custo total do contrato, em valor presente (VP), a ser cobrado pela solução ótima, ou empresa escolhida, de acordo com a variação do grau de confiança, α . Em cada nível de demanda e em cada período de fidelização, a operadora escolhida é aquela indicada na Tabela 4. Os resultados mostram que a empresa contratante deve ficar bastante atenta ao crescimento de sua demanda.

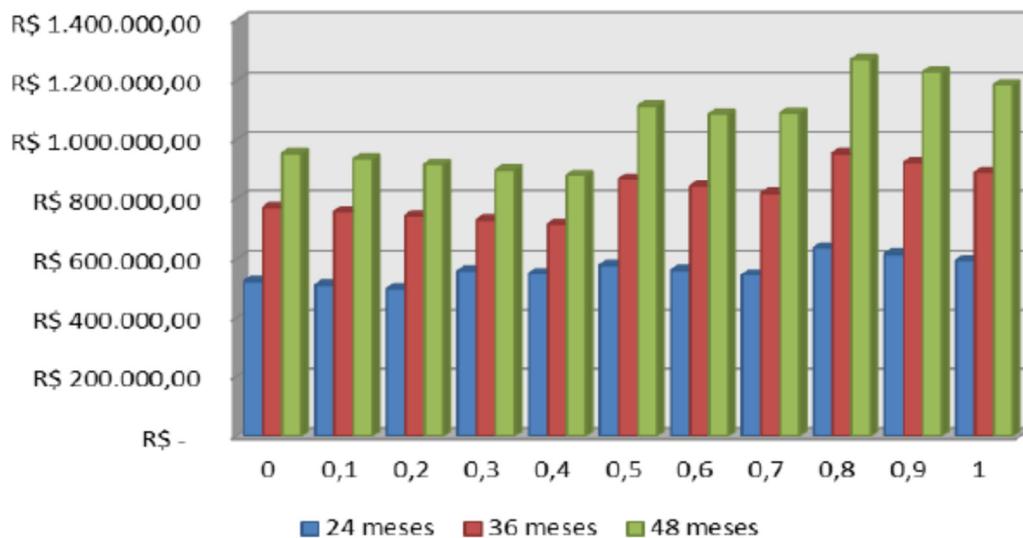


Figura 18 - Custo total do contrato em VP (R\$) x Grau de confiança (α).

Dependendo do nível de demanda a ser contratada é aconselhável adquirir uma configuração de atendimento que privilegie valores de demanda um pouco acima do necessário, porém com o custo de contrato de fidelização um pouco mais barato. Esta situação fica evidente principalmente para os contratos de 48 meses.

Foi apresentada uma aplicação do modelo nó-arco descrito no Capítulo 5 para a seleção de contratos de fidelização de serviços corporativos de telecomunicações. Os dados de demanda imprecisa foram modelados por números *fuzzy* com a função de pertinência triangular, enquanto a tarifa unitária foi ajustada por faixas de valores que acompanham o ganho de escala promovido pelo aumento nos valores de demanda prevista para a ocupação dos serviços a serem contratados.

O ambiente multi-serviço, com demanda *fuzzy* e tarifa ajustável, permite acompanhar a evolução do sistema a ser contratado em situações mais adequadas à competitividade existente no setor. O parâmetro α , que indica o grau de confiança nos valores de demanda prevista, possibilita realizar um ranking das soluções, orientado de acordo com o conhecimento e a intuição do planejador do sistema.

Como resultados de planejamento para os cenários avaliados neste trabalho podem ser destacadas as seguintes observações: a operadora C mostrou-se competitiva apenas para os cenários de previsão de demanda mínima; com o crescimento da demanda, as operadoras A e B mostraram-se como principais concorrentes.

5.3 – APLICAÇÃO DO MODELO ARCO-CAMINHO

No campo de planejamento de rede de telecomunicações, os métodos propostos de soluções que variam desde o caminho mais curto, abordagens baseadas em meta-heurísticas e algoritmos evolutivos, busca tabu e modelos de programação linear inteira. Para obter informações sobre a competitividade de um modelo ou um algoritmo, é necessário dispor de um conjunto de instâncias em que uma nova abordagem pode ser testada e comparada com as anteriores. Infelizmente, tais comparações são raras na literatura de planejamento de rede, que é devido à indisponibilidade de conjuntos de dados de referência. Isso está em contraste com outras áreas de pesquisa onde as bibliotecas de casos de referência padronizados estão disponíveis. Exemplos são MIPLIB para programação inteira mista (ACHTERBERG, 2006), TSPLIB para o problema do caixeiro viajante (REINELT, 1991), SteinLib problemas de árvores de Steiner em grafos (KOCH, 2001) e FAP Web para atribuição de frequências em problemas de redes GSM de telefonia móvel (FAP WEB, 2015). Assim, desde dezembro de 2005 criou-se a biblioteca SNDlib (*Survivable Network Design Library*), que é um repositório que contém instâncias de testes que são aplicados a problemas de otimização em redes de telecomunicações, visando tornar-se um padrão futuro para testes e demonstrando a eficácia de novos modelos de otimização e algoritmos.

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 Raack (2013), Chen (2013), DeFigueiredo (2013), Agarwal (2014) e CantoDosSantos (2011). O Modelo C5-2 utiliza a abordagem arco-caminho e já foi discutido em detalhes no Capítulo 4. Ele foi reescrito de forma compacta, para facilitar o acompanhamento das análises técnico-econômicas desenvolvidas.

Os procedimentos computacionais utilizados para implementação e solução do modelo são os mesmos da Figura 16. Nos apêndices I, II e III são listados exemplos de arquivos de

dados (.dat), arquivo de modelo (.mod) e arquivo de saída, respectivamente, para um dos cenários avaliados aqui.

Modelo C5-2

Função Objetivo:

$$\text{Min} \sum_{[i] \in \text{LINK}} \sum_{[n] \in \text{O}_{\text{LINK}}} \frac{(c_{na} + c_{nb} + c_{nc} + c_{nd})}{4} X_{in}$$

Restrições:

$$\sum_{[k, i] \in A_e} Y_{ki} - \sum_{[j, k] \in A_e} Y_{jk} \leq \frac{\alpha}{2} \cdot \frac{d_{ka} + d_{kb}}{2} + \left(1 - \frac{\alpha}{2}\right) \cdot \frac{d_{kc} + d_{kd}}{2} \quad \forall k \in O_{\text{ERB}}$$

$$\sum_{[k, i] \in A_e} Y_{ki} - \sum_{[j, k] \in A_e} Y_{jk} \geq \frac{\alpha}{2} \cdot \frac{d_{kc} + d_{kd}}{2} + \left(1 - \frac{\alpha}{2}\right) \cdot \frac{d_{ka} + d_{kb}}{2} \quad \forall k \in O_{\text{ERB}}$$

$$\sum_{[j, k] \in \Omega_i} Y_{jk} = W_i, \quad \forall [i] \in \text{LINK}$$

$$Z_i = \sum_{[n] \in \text{O}_{\text{LINK}}} \text{Cap}_n X_{in}, \quad \forall [i] \in \text{LINK}$$

$$W_i \leq Z_i, \quad \forall [i] \in \text{LINK}$$

$$\sum_{[n] \in \text{O}_{\text{LINK}}} X_{in} \leq 1, \quad \forall [i] \in \text{LINK}$$

5.3.1 – REDE ESTUDADA

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 (*Plesiochronous Digital Hierarchy*). Esta rede foi fornecida por um operador de rede, com 11 nós, 34 links e 24 demandas previstas para serem atendidas entre os nós. A Figura 19 apresenta a topologia da rede em estudo. O modelo de demanda (atributo que define o tráfego) utilizado é não direcional e o modelo do

link (atributo que especifica como a capacidade de um *link* é usada) utilizado é o não direcional.

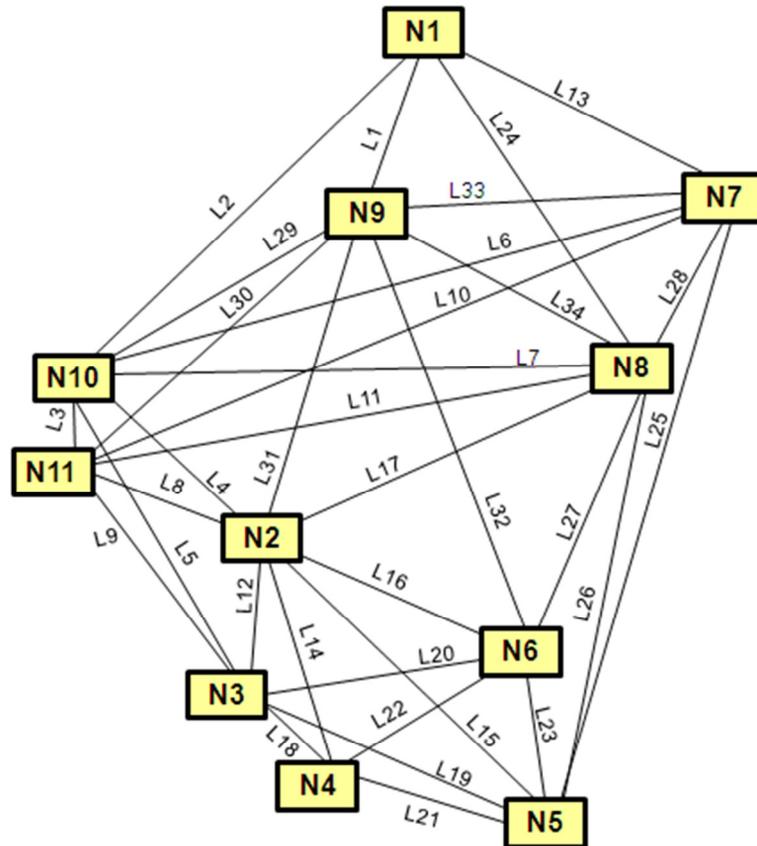


Figura 19 - Topologia da rede.

Fonte: <http://sndlib.zib.de>

A capacidade do *link* usada é explícita, isto é, uma única capacidade pode ser instalada, levando em consideração que não há um custo de carga fixa. O roteamento de demanda pela rede é contínuo, ou seja, a quantidade de tráfego que flui na rede em qualquer caminho é arbitrária, sendo admissíveis todos os caminhos, isto é, o tráfego de uma demanda pode ser encaminhado em qualquer caminho entre os nós das extremidades da demanda. Não são considerados os custos de roteamento de demanda e os custos de capacidade pré-instalada (ORLOWSKI, 2010). A versão utilizada do CPLEX® tem uma limitação no número total de variáveis que podem ser utilizadas, assim foram candidatados cinco caminhos para cada demanda e isto pode ser verificado no arquivo de dados (Apêndice I). A Tabela 5 apresenta os valores para as 24 demandas prevista (em canais E1) e também indica entre quais nós existe previsão de demanda. A demanda é tratada como um número *fuzzy* modelado por uma função de pertinência trapezoidal.

Tabela 5 - Demanda prevista imprecisa.

	<i>Entre os nós</i>	<i>Demanda (em canais E1)</i>					<i>Entre os nós</i>	<i>Demanda (em canais E1)</i>			
		<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>			<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>
\tilde{D}_1	N9-N2	268,8	345,6	422,4	499,2	\tilde{D}_{13}	N5-N8	75,6	97,2	118,8	140,4
\tilde{D}_2	N3-N4	150,5	193,5	236,5	279,5	\tilde{D}_{14}	N4-N5	73,5	94,5	115,5	136,5
\tilde{D}_3	N7-N8	148,4	190,8	233,2	275,6	\tilde{D}_{15}	N9-N8	70,0	90,0	110,0	130,0
\tilde{D}_4	N10-N3	137,9	177,3	216,7	256,1	\tilde{D}_{16}	N11-N3	69,3	89,1	108,9	128,7
\tilde{D}_5	N9-N11	112,0	144,0	176,0	208,0	\tilde{D}_{17}	N5-N6	66,5	85,5	104,5	123,5
\tilde{D}_6	N2-N8	112,0	144,0	176,0	208,0	\tilde{D}_{18}	N2-N3	194,6	250,2	305,8	361,4
\tilde{D}_7	N2-N5	100,8	129,6	158,4	187,2	\tilde{D}_{19}	N11-N2	186,2	239,4	292,6	345,8
\tilde{D}_8	N1-N7	96,6	124,2	151,8	179,4	\tilde{D}_{20}	N9-N10	184,1	236,7	289,3	341,9
\tilde{D}_9	N3-N5	86,8	111,6	136,4	161,2	\tilde{D}_{21}	N1-N9	180,6	232,2	283,8	335,4
\tilde{D}_{10}	N6-N8	80,5	103,5	126,5	149,5	\tilde{D}_{22}	N9-N7	172,9	222,3	271,7	321,1
\tilde{D}_{11}	N1-N10	80,5	103,5	126,5	149,5	\tilde{D}_{23}	N2-N6	165,9	213,3	260,7	308,1
\tilde{D}_{12}	N10-N11	254,8	327,6	400,4	473,2	\tilde{D}_{24}	N2-N4	165,9	213,3	260,7	308,1

A Tabela 6 lista os valores médios (V_m) das 24 demandas previstas. A planilha de custos dos sistemas de transmissão a serem dimensionados, em função de qual *link* deve ser alocado, encontra-se no Anexo I. Os dados de custo, demanda e de rede podem ser conferidos no arquivo de dados (Apêndice I).

Tabela 6 - Demanda prevista – Valor Médio.

<i>Demanda</i>	<i>Entre os nós</i>	<i>Valor Médio (em canais E1)</i>	<i>Demanda</i>	<i>Entre os nós</i>	<i>Valor Médio (em canais E1)</i>
<i>D1</i>	N9-N2	384	<i>D13</i>	N5-N8	108
<i>D2</i>	N3-N4	215	<i>D14</i>	N4-N5	105
<i>D3</i>	N7-N8	212	<i>D15</i>	N9-N8	100
<i>D4</i>	N10-N3	197	<i>D16</i>	N11-N3	99
<i>D5</i>	N9-N11	160	<i>D17</i>	N5-N6	95
<i>D6</i>	N2-N8	160	<i>D18</i>	N2-N3	278
<i>D7</i>	N2-N5	144	<i>D19</i>	N11-N2	266
<i>D8</i>	N1-N7	138	<i>D20</i>	N9-N10	263
<i>D9</i>	N3-N5	124	<i>D21</i>	N1-N9	258
<i>D10</i>	N6-N8	115	<i>D22</i>	N9-N7	247
<i>D11</i>	N1-N10	115	<i>D23</i>	N2-N6	237
<i>D12</i>	N10-N11	364	<i>D24</i>	N2-N4	237

5.3.2 – RESULTADOS OBTIDOS

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, α , 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 (Figura 15, Capítulo 4).

Tabela 7 - Resultado das simulações para diferentes valores do grau de confiança (α).

<i>Grau de Confiança (%)</i>	<i>Custo Total (\$)</i>	<i>Link 30 E1</i>	<i>Link 480 E1</i>	<i>Link 1920 E1</i>	<i>Folga (em canais E1)</i>	<i>Esforço Computacional</i>	
						<i>Simplex</i>	<i>Branch and-Bound</i>
0	9.844.781	2	13	-	822	33.167	1.866
5	9.959.084	3	13	-	860	47.136	2.573
10	10.000.170	-	13	-	817	60.969	3.841
15	10.000.170	-	13	-	749	32.485	1.810
20	10.103.608	1	13	-	784	48.330	2.645
25	10.206.251	2	13	-	785	46.041	2.931
30	10.233.016	2	13	-	745	45.266	2.533
35	10.335.659	3	13	-	638	57.015	3.068
40	10.353.509	3	13	-	795	55.625	3.085
45	10.478.147	4	13	-	773	53.658	2.935
50	10.608.350	5	13	-	622	77.693	4.048
55	10.608.350	5	13	-	752	41.591	2.379
60	10.715.498	6	13	-	609	71.352	3.832
65	10.798.443	6	13	-	686	54.175	3.344
70	10.859.626	-	14	-	1.143	60.364	3.869
75	10.859.626	-	14	-	1.086	35.454	2.113
80	10.859.626	-	14	-	922	38.248	2.350
85	10.859.626	-	14	-	853	34.225	1.839
90	10.859.626	-	14	-	793	13.718	654
95	10.859.626	-	14	-	734	8.951	420
100	10.859.626	-	14	-	783	7.537	360

Desta maneira, o aumento no valor de (α) aumenta também o valor da demanda prevista e, conseqüentemente, o custo total da rede. Considerando a possibilidade de escoamento de cada demanda prevista por cinco caminhos distintos (Apêndice II), as soluções de rede obtidas, a partir do grau de confiança (α) do planejador encontra-se na Tabela 7. Pode 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 esforço computacional envolvido, onde é apresentada a quantidade necessária de iterações dos algoritmos Simplex (resolução das variáveis reais) e *branch and bound* (resolução das variáveis binárias), para a obtenção da solução ótima. Tem-se uma relação aproximada de 20 por 1, ou seja, para cada iteração do *branch and bound* aproximadamente 20 iteração ocorre do método Simplex, isto ocorre pelo fato que o maior esforço computacional envolvido está na resolução das variáveis inteiras.

A topologia da rede a ser implantada para atender a demanda prevista para um fator de confiança $\alpha = 0$ é apresentado na Figura 20.

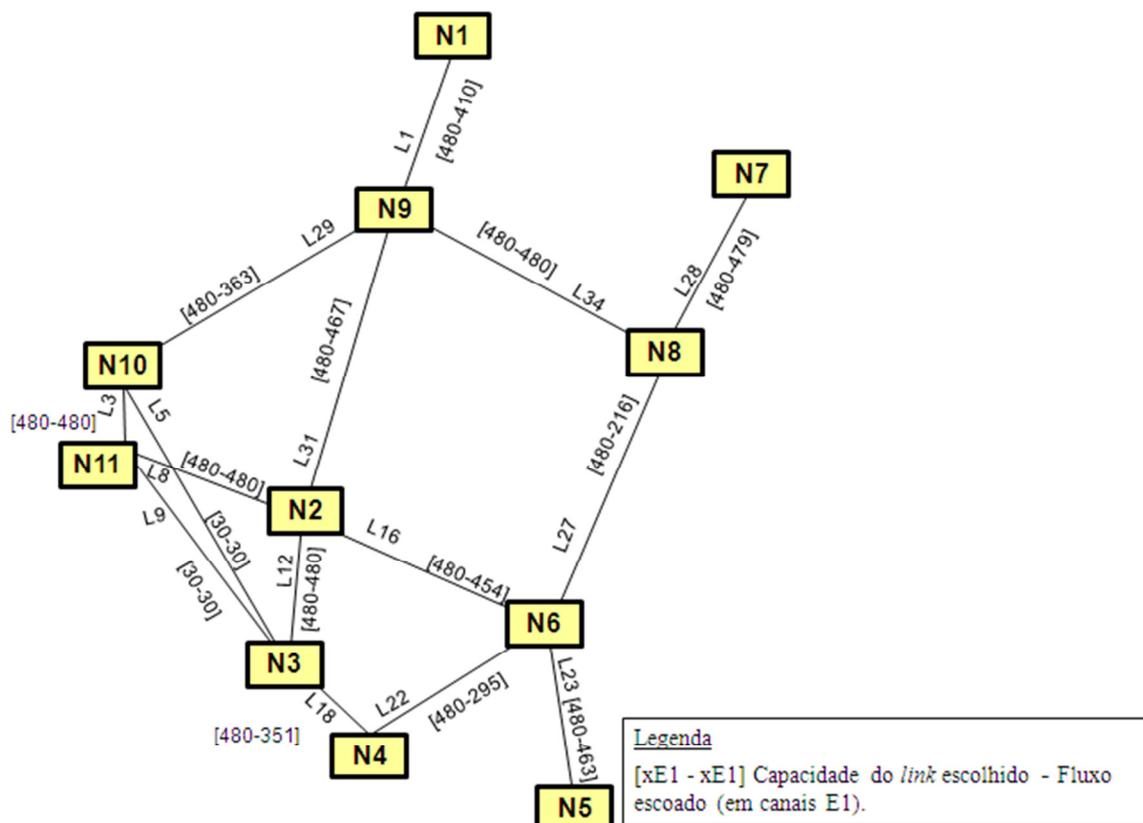


Figura 20 - Topologia de rede com grau de confiança de 0%.

mesmo para $\alpha = 0,55$, mas a folga para o grau de confiança de 50% ($662 \times E1$) é menor quando comparado para a confiança de 55% ($752 \times E1$).

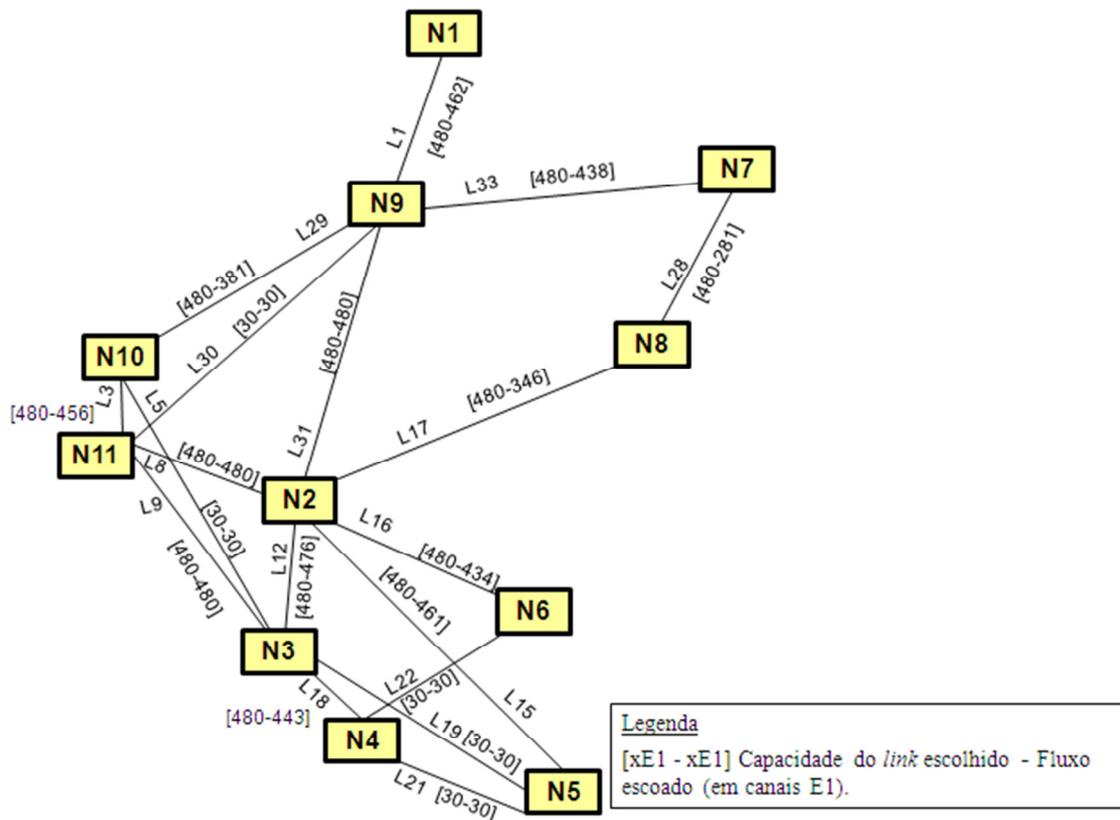


Figura 22 - Topologia de rede com grau de confiança de 50%.

A Figura 23 apresenta a topologia de rede a ser implantada com grau de confiança de 100%. O custo de implantação desta rede é o mesmo para diferentes graus de confiança, variando de 70% a 100% e a quantidade de *links* alocados de capacidade de $480 \times E1$ também é a mesma (14 *links* de $480 \times E1$). Nestes cenários ($\alpha = 0,70 \rightarrow \alpha = 1,00$) o grau de confiança de 70% é o que possui maior folga ($1.114 \times E1$). Em todos os cenários ($\alpha = 0,00 \rightarrow \alpha = 1,00$), o com o grau de confiança de 100% é o que possui menor complexidade computacional para obtenção da solução ótima e em nenhum dos casos foi alocado *link* de capacidade de $1920 \times E1$. Isso ocorre devido aos valores de demanda prevista não estarem na mesma proporção desta capacidade. Para o grau de confiança de 100%, têm-se os mesmos valores de demanda prevista para o cenário da biblioteca SNDlib (ORLOWSKI, 2010), o valor do custo de implantação encontrado aqui é de 2% menor quando comparado com o resultado presente na biblioteca que é de \$11.114.202.

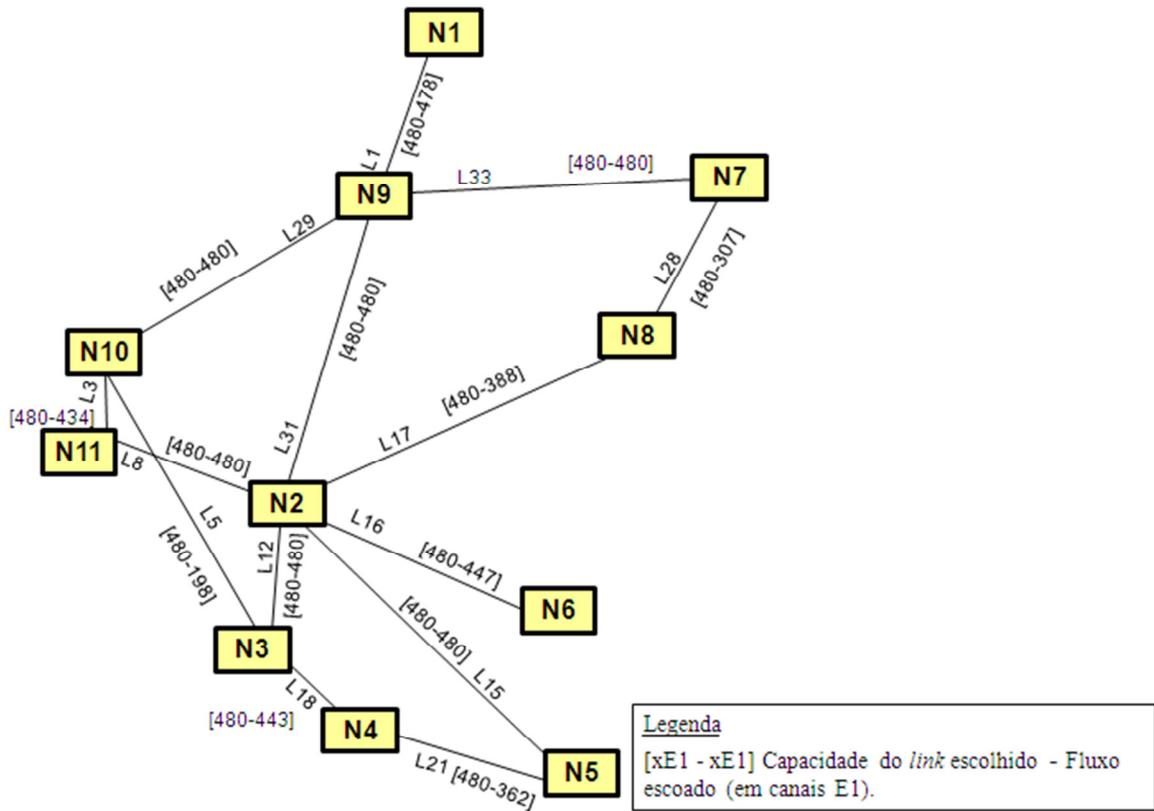


Figura 23 - Topologia de rede com grau de confiança de 100%.

O modelo proposto demonstrou eficiência (2% a menos para implantação da rede) para a resolução do problema presente na biblioteca SNDlib onde foi utilizada abordagem a programação linear inteira mista juntamente com a lógica *fuzzy*, diferentemente da abordagem presente na biblioteca onde se utiliza formulações de programação inteira mista.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÃO

O surgimento de novas tecnologias e a possibilidade de oferecer novos serviços aos usuários são características atuais das telecomunicações. Grandes operadores de rede, múltiplos provedores de serviço e uma enorme variedade de fornecedores de equipamentos disputam este mercado.

O sistema de acesso, por representar o segmento responsável pelo atendimento individual dos usuários, é o foco imediato destas transformações. Planejar a sua evolução não é uma tarefa simples, tendo em vista a necessidade da utilização de recursos financeiros volumosos. É inevitável o surgimento de dúvidas sobre quais serviços oferecer, bem como sobre as suas rentabilidades.

Como há tecnologias atuais que se apresentam economicamente viáveis (um *backbone* de entroncamento entre centrais telefônicas, por exemplo), 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 sistemas de apoio à decisão fundamentados em modelos matemáticos flexíveis, os quais podem ser aplicados no planejamento de sistemas de telecomunicações, tanto para seleção de serviços de telecomunicações utilizando a abordagem nó-arco bem como para a implantação de uma rede *backbone*, em situações onde existe imprecisão sobre os valores adotados (demanda e custo). A rede é vista como um grafo e a modelagem é traduzida como um problema de programação linear inteira mista, o qual obedece a restrições. A imprecisão é abordada de acordo com o conceito de números *fuzzy*. Um método de solução utilizando a abordagem nó-arco baseado em programação matemática é elaborado para tratar o problema correspondente à seleção de serviços em telecomunicações, onde se pode destacar:

- Possibilidade de realizar um planejamento multi-serviço;
- Possibilidade de atribuir prioridades no atendimento dos serviços;
- Flexibilidade de adaptação às novas tecnologias e aos serviços a serem oferecidos;

- Possibilidade de classificação de redes, em que o planejador é capaz de selecionar aquela(s) que atende(m) à(s) sua(s) exigência(s) de fornecimento de serviços e, ao mesmo tempo, permite(m) vislumbrar outros planos que possibilitam acompanhar a evolução da demanda prevista.

São relatados e discutidos os resultados da aplicação da metodologia no planejamento da infraestrutura de uma rede *backbone* com várias demandas previstas, utilizando a abordagem arco-caminho numa rede do repositório SNDlib. É agregado na metodologia a lógica *fuzzy* para o modelo aceitar a imprecisão, visando a flexibilidade, onde se pode destacar:

- Flexibilidade, devido à modelagem da imprecisão, situações onde alguns dados fundamentais para o planejamento da rede não se encontram disponíveis ou não são precisos, podem ser facilmente incorporadas ao modelo;
- Eficiência do modelo na busca de boas soluções. O planejador pode variar parâmetros do modelo a fim de obter soluções de rede otimizadas de acordo com as condições que julgar mais interessante;
- Eficácia do modelo, no que se refere ao ganho de 2% na solução ótima quando comparada a solução obtida na biblioteca de instâncias de testes para o planejamento de redes em telecomunicações (SNDlib);
- Embora o modelo tenha sido utilizado para dimensionar a implantação de uma rede *backbone*, a metodologia é passível de ser aplicada à outros sistemas de telecomunicações, com pequenas adaptações.

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 das telecomunicações. A flexibilidade quanto a variações nos cenários possíveis de serem contemplados é um dos seus principais atributos.

Num momento de expressivas mudanças tecnológicas, com imprevisibilidades marcantes em termos de demanda futura, custos e orçamentos, as abordagens que utilizam o critério de minimização de custo, acrescidas do tratamento *fuzzy* quanto ao cenário mercadológico dos sistemas de telecomunicações, abrem grandes perspectivas. Não se pretende chegar a um planejamento completamente automatizado, mas sim dispor de modelos matemáticos refinados e capazes de fornecer resultados úteis. O papel do planejador é reforçado, sendo possível analisar em detalhe as variantes do problema e estabelecer diretrizes de grande importância para decisões futuras. Durante o andamento deste trabalho de pesquisa, publicou-

se o artigo DeSousa et al., (2014), sobre a aplicação do modelo para a seleção de contratos de serviços em telecomunicações, com importantes retornos e possibilidade de discussões sobre a aplicação do modelo com a comunidade científica. Este trabalho não se esgota aqui, pois são várias as possibilidades a serem estudadas em trabalhos futuros, tais como:

- Avaliar outras instâncias da SNDlib com o objetivo de conferir o desempenho computacional dos modelos propostos, frente a uma mudança no número de variáveis e/ou restrições;
- Parametrizar a função objetivo da abordagem arco-caminho;
- Utilizar a abordagem arco-caminho para avaliar os cenários de aluguel de rede SDH em sistemas de acesso móvel celular, que aqui foram tratados na abordagem nó-arco. A proposta é comparar as duas abordagens diante de um mesmo cenário;
- O cenário de serviços é dinâmico, abrangendo diferentes possibilidades, as quais podem ser estudadas em trabalhos futuros. Adaptação nos modelos, no sentido de incorporar novas tecnologias e serviços, parece um passo natural;
- Os próprios métodos a serem adotados na resolução dos modelos apresentados geram grandes oportunidades de pesquisa. Embora os problemas matemáticos associados aos modelos tenham sido resolvidos por *solvers* convencionais (o que é interessante para os planejadores), não se pode desprezar o avanço de novas técnicas de resolução de problemas PLIM. Outros algoritmos que fazem uso de metaheurísticas, tais como *simulated annealing*, busca tabu ou algoritmo genético, também podem ser testados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abdel Khalek, A., Al-Kanj, L., Dawy, Z., Turkiyyah, G. **Optimization models and algorithms for joint uplink/downlink UMTS radio network planning with SIRbased power control**. IEEE Transactions on Vehicular Technology 60 (May (4)), 1612–1625, 2011.
- Achterberg, T., Koch, T., e Martin, A. **MIPLIB**. Operations Research Letters, 34(4), 361-372, 2006.
- Agarwal, Y. K., Venkateshan, P. **Survivable network design with shared-protection routing**. European Journal of Operational Research, 2014.
- Ampl. **ILOG AMPL – Manual do Usuário 12.2**, 2010.
- Anatel. **Índice de Serviços de Telecomunicações (IST)**. Disponível em <http://www.anatel.gov.br>, 2014.
- Asga. **Especificações Técnicas de Modems Ópticos**. Website do fabricante Asga: <http://www.asga.com.br/category/produtos>. Acessado em 18/01/2015.
- Bazaraa, M.S., Jarvis, J.J. e Sherali, H.D. **Linear Programming and Network Flows**. 4a Edição, Willey, New York, 2010.
- Campos, L. and Verdegay, J.L. **Linear Programming Problems and Ranking of Fuzzy Numbers**. Fuzzy Sets and Systems: 32, pp. 1-11, 1989.
- CantoDosSantos, J. V.; Barreto, M. B. **Computational System Based on Genetic Algorithm for Planning and Restoration of Telecommunication Networks**. In: IADIS International Conference Applied Computing, Rio de Janeiro - RJ, v. Único. p. 241-248, 2011.
- Cplex . **ILOG CPLEX – Manual do Usuário 11.2**, 2008.
- Chen, R., L. Y., Phillips, C. A. **Edge Failure Resilient Network Design**. Electronic Notes in Discrete Mathematics, v. 41, p. 375-382, 2013.
- Dantzig, G. B. **Linear programming and extensions**. Princeton university press, 1998.
- Deb, K. **Multi-objective optimization using evolutionary algorithms**. John Wiley & Sons, 2001.

DeSousa, M. A., Carlson, C. M. F., Vieira, F. H. T. **Optimum Allocation of Transmission Technologies for Solving the BTS Interconnection Problem in Cellular systems.** In: P. Vasant. (Org.). Handbook of Research on Artificial Intelligent Techniques and Algorithms. 1aed.: v. , p. 150-180, 2014.

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

DeSousa, M.A., Vieira, F.H.T., Carlson, C.M.F., Gonçalves, B.H.P. e Costa, V.H.T. **Sistema de Apoio à Decisão MILP-Fuzzy para o Planejamento de Redes de Acesso em Telecomunicações.** Meta-heurísticas em Pesquisa Operacional, por H.S. Lopes, L.C.A. Rodrigues, M.T.A. Steiner (Eds.). Ed. Omnipax, pp. 401-417, 2013.

DeSousa, M. A., Santos, M. T. L., DeOliveira, B. Q. **Um Modelo de Suporte à Decisão para a Avaliação Técnico-econômica de Contratos de Serviços Comporativos de Telecomunicações Mediante Dados Intertos.** In: XVIII Congresso Brasileiro de Automática - CBA-2010, Bonito – MS, 2010.

DeOliveira, B. Q., Santos, M. T. L., Dantas, M. J. P., DeSousa, M. A. **Modelo de Otimização para Alocação de Links em um Sistema 3G.** In: I Congresso de Matemática Aplicada e Computacional da Região Sudeste, 2011, Uberlândia. Modelo de Otimização para Alocação de Links em um Sistema 3G, 2011.

DeOliveira, B. Q. Santos, M. T. L. DeSousa, M. A. **Dimensionamento de enlaces SDH para a interconexão de ERBs em um sistema 3G - Um estudo de caso para cenários de contratos de aluguel.** In: SBPO, Ubatuba-SP. SOPRAPO, 2011. p. 1-1.

Digitel. **Especificações Técnicas de Modems SHDSL.** Website do fabricante Digitel. <http://www.digitel.com.br/pt/produtos>. Acessado em 18/01/2015.

DeFigueiredo, R. M., CantoDosSantos, J. V. **Um comparativo entre métodos computacionais para planejamento de redes de telecomunicações.** Revista Brasileira de Computação Aplicada, v. 5, n. 1, p. 14-25, 2013.

Driankov, D., e Palm, R. **Advances in fuzzy control.** Physica-Verlag, 2013.

Ericsson. **Especificações Técnicas de Sistemas de Rádio Microondas**. Website do fabricante. <http://www.ericsson.com/ourportfolio/products/microwave-networks>. Acessado em 18/01/2015.

FAP Web. **Website dedicado ao problema de atribuição de frequência em redes de comunicação sem fio**. Website: <http://fap.zib.de>. Acessado em 11/01/2015.

Fourer, R., Gay, D.M. e Kernighan, B.W. **AMPL - A Modeling Language for Mathematical Programming**. 2a Edição, 2002.

George J. K., L. I. R., e Yuan Bo. **Fuzzy sets and fuzzy logic, theory and applications**, 2008.

Jeszensky, P. J.E. **Sistemas Telefônicos**. Ed. Manole, Barueri-SP, 2004.

Koch, T., Martin, A., e Voß, S. **SteinLib: An updated library on Steiner tree problems in graphs** (pp. 285-325). Springer US, 2001.

Komnakos, D., Skoutas, D.N., Vouyioukas, D., Rouskas, A.N. **A delay optimal scheduling policy for real time services in WCDMA systems**. Springer Wireless Personal Communications Journal (May), 2010.

Kumar, B., & Jayaraj, N. **Network Planning and Engineering for Fiber Optic Transport Systems**. Network, 2(5), 2014.

Land, A. H. e Doig, A. G. **An automatic method for solving discrete programming problems**. Econometrica, vol. 28, n. 3, pp. 497-520, 1960.

Laiho, J., Wacker, A., & Novosad, T. (Eds.). **Radio network planning and optimisation for UMTS**. John Wiley & Sons, 2006.

Letourneux, F., Corre, Y., Suteau, E., Lostanlen, Y. **3D coverage analysis of LTE urban heterogeneous networks with dense femtocell deployments**. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, October, 2012.

Madronero, D.M., Mula, J. e Jiménez, M. **A modified approach based on ranking fuzzy numbers for fuzzy integer programming with equality constraints**. 6th International Conference on Industrial Engineering and Industrial Management. Vigo, pp. 375-382, 2012.

- Nawrocki, M. J., Dohler, M., & Aghvami, A. H. **Understanding UMTS radio network modelling, planning and automated optimisation**. Chichester (West Sussex): Wiley, 2006.
- Orlowski, S., Wessaly, R., Pióro, M., e Tomaszewski, A. **SNDlib 1.0 - Survivable network design library**. *Networks*, 55(3), 276-286., 2010.
- Pióro, M., e Medhi, D. **Routing, flow, and capacity design in communication and computer networks**. Elsevier, 2004.
- Pilão, N.E. e Hummel, P.R.V. **Matemática Financeira e Engenharia Econômica**. Ed. Thomson, São Paulo-SP, 2004.
- Pedrycz, W. e F. Gomide. **An Introduction to Fuzzy Sets: Analysis and Design**. MIT Press, Cambridge, MA., 1998.
- Peidro, D., Mula, J., Jiménez, M., Mar Botella, M. **A fuzzy linear programming based approach for tactical supply chain planning in an uncertainty environment**. *European Journal of Operational Research*, 205, pp. 65–80, 2010.
- Raack, C., W. A. **Towards optimizing the deployment of optical access networks**. *Euro Journal on Computational Optimization*, 17-53, 2013.
- Reinelt, G. **TSPLIB—A traveling salesman problem library**. *ORSA journal on computing*, 3(4), 376-384, 1991.
- Samanta, S., e Pal, M. **Telecommunication system based on fuzzy graphs**. *J Telecommun Sys Manag*, 3(1), 1-6, 2013.
- Skianis, C. **Introducing automated procedures in 3G network planning and optimization**. *Journal of Systems and Software*, 86(6), 1596-1602, 2013.
- St-Hilaire, M., Chinneck, J. W., Chamberland, S., & Pierre, S. **Efficient solution of the 3G network planning problem**. *Computers & Industrial Engineering*, 63(4), 819-830, 2012.
- Sahinidis, N.V.. **Optimization under Uncertainty: State-of-the-art and Opportunities**. *Computer & Chemical Engineering* 28 (6-7), pp. 971-983, 2004.
- Sharma, S.C. e Bansal, A. **Mixed integer linear programming problems with fuzzy variables**. *International Journal of Mathematical Archive*, 2 (4), 438-443, 2011.

Taha, H.A. **Pesquisa Operacional**. Ed. Prentice Hall, 8a Edição, 2008.

Teleco. Website: <http://www.teleco.com.br>. Acessado em 18/01/2015.

Tripathy, P. K., Dash, R. K., & Tripathy, C. R. **A Genetic Algorithm Based Approach for Topological Optimization of Interconnection Networks**. *Procedia Technology*, 6, 196-205 2012.

Wolsey, L. A., & Nemhauser, G. L. **Integer and combinatorial optimization**. John Wiley & Sons, 2014.

Zadeh, L. A., **Fuzzy Sets**. *Information and Control*, v. 8, n. 3 (Jun), pp. 338-353, 1965.

Zionts, S. **Linear and integer programming**. Prentice Hall, 1974.

APÊNDICE I

A seguir é apresentado um exemplo de arquivo de dados (.dat) utilizado nos cenários avaliados no Modelo C5-2, item 5.3 (abordagem arco-caminho).

#Conjunto nós da Rede:

set NODE:=

N01, N02, N03, N04, N05, N06N07, N08, N09, N10, N11, N12, N13;

#Conjunto *links* da Rede:

set LINK :=

L01, L02, L03, L04, L05, L06, L07, L08, L09, L10, L11, L12, L13, L14, L15, L16, L17, L18, L19, L20, L21, L22, L23, L24, L25, L26, L27, L28, L29, L30, L31, L32, L33, L34;

#Conjunto demandas da Rede:

set DEMANDA:=

D01, D02, D03, D04, D05, D06, D07, D08, D09, D10, D11, D12, D13, D14, D15, D16, D17, D18, D19, D20, D21, D22, D23, D24;

#Conjunto de caminhos:

set PATH:=

P01, P02, P03, P04, P05;

#O conjunto de caminhos é realizado para todas as 24 demandas, são apresentados dois exemplos a seguir:

#Conjunto de caminhos para a demanda D01:

set PATH_D01:=

(P01,D01) #L31; (P02,D01) #L30 L08; (P03,D01) #L34 L17; (P04,D01) #L32 L16;
(P05,D01) #L29 L03 L8;

#Conjunto de caminhos para a demanda D02:

set PATH_D02:=

(P01,D02) #L18; (P02,D02) #L12 L14; (P03,D02) #L20 L22; (P04,D02) #L19 L21;
(P05,D02) #L12 L16 L22;

#Conjunto de caminhos utilizando cada *link*. Procedimento realizado para todos os 34 *links*. São apresentados dois exemplos a seguir:

#Conjunto de caminhos utilizando L01:

set LINK01_forward:=

(L01,P05,D03); (L01,P02,D08); (L01,P04,D08); (L01,P05,D08); (L01,P02,D11);
(L01,P05,D11); (L01,P01,D21);

set LINK01_backward:=

(L01,P03,D20); (L01,P02,D22); (L01,P05,D15);

#Conjunto de caminhos utilizando L02:

set LINK02_forward:=

(L02,P01,D11); (L02,P03,D20);

set LINK02_backward:= ;

#Conjunto sistemas PDH da Rede:

set PDH:= PDH01; PDH03; PDH04;

#Dados de Demanda Prevista (em canais E1), são apresentados cinco exemplos a seguir:

param: Demanda_a Demanda_b Demanda_c Demanda_d :=

D01	268.8	345.6	422.4	499.2
D02	150.5	193.5	236.5	279.5
D03	148.4	190.8	233.2	275.6
D04	137.9	177.3	216.7	256.1
D05	112.0	144.0	176.0	208.0;

#Dados de Custo dos Sistemas PDH em cada *link* (valores médios). São apresentados cinco exemplos a seguir:

param: PDH_Custo :=

L01,PDH01 88933 ; L01,PDH03 691901; L01,PDH04 1625091; L02,PDH01
149283; L02,PDH03 988231 ; L02,PDH04 2498805; L03,PDH01 59431; L03,PDH03
530267; L03,PDH04 1162431 ; L04,PDH01 106353; L04,PDH03 781681;
L04,PDH04 1886283; L05,PDH01 129408; L05,PDH03 892606; L05,PDH04
2215230;

#Capacidade dos Sistemas PDH (em canais E1):

param PDH_Capacidade :=

PDH01: 30; PDH03: 480; PDH04: 1920;

#Fator de Confiança nos Dados:

param ALFA :=1.0

APÊNDICE II

A seguir é apresentado um exemplo de arquivo modelo (.mod) para a abordagem arco-caminho que resolve o Modelo C5-2 do Capítulo 5.

```

#Conjunto de nós da Rede:

set NODE;

#Conjunto de links da Rede:

set LINK;

#Conjunto de demandas da Rede:

set DEMANDA;

#Conjunto de caminhos:

set PATH;

#Conjuntos de caminhos para cada demanda:

set PATH_D01 within {PATH,DEMANDA}; set PATH_D02 within {PATH,DEMANDA};
set PATH_D03 within {PATH,DEMANDA}; set PATH_D04 within {PATH,DEMANDA};
set PATH_D05 within {PATH,DEMANDA}; set PATH_D06 within {PATH,DEMANDA};
set PATH_D07 within {PATH,DEMANDA}; set PATH_D08 within {PATH,DEMANDA};
set PATH_D09 within {PATH,DEMANDA}; set PATH_D10 within {PATH,DEMANDA};
set PATH_D11 within {PATH,DEMANDA}; set PATH_D12 within {PATH,DEMANDA};
set PATH_D13 within {PATH,DEMANDA}; set PATH_D14 within {PATH,DEMANDA};
set PATH_D15 within {PATH,DEMANDA}; set PATH_D16 within {PATH,DEMANDA};
set PATH_D17 within {PATH,DEMANDA}; set PATH_D18 within {PATH,DEMANDA};
set PATH_D19 within {PATH,DEMANDA}; set PATH_D20 within {PATH,DEMANDA};
set PATH_D21 within {PATH,DEMANDA}; set PATH_D22 within {PATH,DEMANDA};
set PATH_D23 within {PATH,DEMANDA}; set PATH_D24 within {PATH,DEMANDA};

#Conjunto de todos os caminhos:

set PATH_ALL :=

PATH_D01 union PATH_D02 union PATH_D03 union PATH_D04 union PATH_D05
union PATH_D06 union PATH_D07 union PATH_D08 union PATH_D09 union

```

PATH_D10 union PATH_D11 union PATH_D12 union PATH_D13 union PATH_D14
 union PATH_D15 union PATH_D16 union PATH_D17 union PATH_D18 union
 PATH_D19 union PATH_D20 union PATH_D21 union PATH_D22 union PATH_D23
 union PATH_D24;

#Conjunto de caminhos utilizando LINK_forward:

set LINK01_forward within {LINK,PATH,DEMANDA}; set LINK02_forward within
 {LINK,PATH,DEMANDA}; set LINK03_forward within {LINK,PATH,DEMANDA}; set
 LINK04_forward within {LINK,PATH,DEMANDA}; set LINK05_forward within
 {LINK,PATH,DEMANDA}; set LINK06_forward within {LINK,PATH,DEMANDA}; set
 LINK07_forward within {LINK,PATH,DEMANDA}; set LINK08_forward within
 {LINK,PATH,DEMANDA}; set LINK09_forward within {LINK,PATH,DEMANDA}; set
 LINK10_forward within {LINK,PATH,DEMANDA}; set LINK11_forward within
 {LINK,PATH,DEMANDA}; set LINK12_forward within {LINK,PATH,DEMANDA}; set
 LINK13_forward within {LINK,PATH,DEMANDA}; set LINK14_forward within
 {LINK,PATH,DEMANDA}; set LINK15_forward within {LINK,PATH,DEMANDA}; set
 LINK16_forward within {LINK,PATH,DEMANDA}; set LINK17_forward within
 {LINK,PATH,DEMANDA}; set LINK18_forward within {LINK,PATH,DEMANDA}; set
 LINK19_forward within {LINK,PATH,DEMANDA}; set LINK20_forward within
 {LINK,PATH,DEMANDA}; set LINK21_forward within {LINK,PATH,DEMANDA}; set
 LINK22_forward within {LINK,PATH,DEMANDA}; set LINK23_forward within
 {LINK,PATH,DEMANDA}; set LINK24_forward within {LINK,PATH,DEMANDA}; set
 LINK25_forward within {LINK,PATH,DEMANDA}; set LINK26_forward within
 {LINK,PATH,DEMANDA}; set LINK27_forward within {LINK,PATH,DEMANDA}; set
 LINK28_forward within {LINK,PATH,DEMANDA}; set LINK29_forward within
 {LINK,PATH,DEMANDA}; set LINK30_forward within {LINK,PATH,DEMANDA}; set
 LINK31_forward within {LINK,PATH,DEMANDA}; set LINK32_forward within
 {LINK,PATH,DEMANDA}; set LINK33_forward within {LINK,PATH,DEMANDA}; set
 LINK34_forward within {LINK,PATH,DEMANDA};

set LINK_forward :=

LINK01_forward union LINK02_forward union LINK03_forward union LINK04_forward
 union LINK05_forward union LINK06_forward union LINK07_forward union
 LINK08_forward union LINK09_forward union LINK10_forward union LINK11_forward
 union LINK12_forward union LINK13_forward union LINK14_forward union
 LINK15_forward union LINK16_forward union LINK17_forward union LINK18_forward
 union LINK19_forward union LINK20_forward union LINK21_forward union
 LINK22_forward union LINK23_forward union LINK24_forward union LINK25_forward
 union LINK26_forward union LINK27_forward union LINK28_forward union
 LINK29_forward union LINK30_forward union LINK31_forward union LINK32_forward
 union LINK33_forward union LINK34_forward;

#Conjunto de caminhos utilizando LINK_backward:

set LINK01_backward within {LINK,PATH,DEMANDA}; set LINK02_backward within
 {LINK,PATH,DEMANDA}; set LINK03_backward within {LINK,PATH,DEMANDA}; set
 LINK04_backward within {LINK,PATH,DEMANDA}; set LINK05_backward within
 {LINK,PATH,DEMANDA}; set LINK06_backward within {LINK,PATH,DEMANDA}; set
 LINK07_backward within {LINK,PATH,DEMANDA}; set LINK08_backward within

```
{LINK,PATH,DEMANDA}; set LINK09_backward within {LINK,PATH,DEMANDA}; set
LINK10_backward within {LINK,PATH,DEMANDA}; set LINK11_backward within
{LINK,PATH,DEMANDA}; set LINK12_backward within {LINK,PATH,DEMANDA}; set
LINK13_backward within {LINK,PATH,DEMANDA}; set LINK14_backward within
{LINK,PATH,DEMANDA}; set LINK15_backward within {LINK,PATH,DEMANDA}; set
LINK16_backward within {LINK,PATH,DEMANDA}; set LINK17_backward within
{LINK,PATH,DEMANDA}; set LINK18_backward within {LINK,PATH,DEMANDA}; set
LINK19_backward within {LINK,PATH,DEMANDA}; set LINK20_backward within
{LINK,PATH,DEMANDA}; set LINK21_backward within {LINK,PATH,DEMANDA}; set
LINK22_backward within {LINK,PATH,DEMANDA}; set LINK23_backward within
{LINK,PATH,DEMANDA}; set LINK24_backward within {LINK,PATH,DEMANDA}; set
LINK25_backward within {LINK,PATH,DEMANDA}; set LINK26_backward within
{LINK,PATH,DEMANDA}; set LINK27_backward within {LINK,PATH,DEMANDA}; set
LINK28_backward within {LINK,PATH,DEMANDA}; set LINK29_backward within
{LINK,PATH,DEMANDA}; set LINK30_backward within {LINK,PATH,DEMANDA}; set
LINK31_backward within {LINK,PATH,DEMANDA}; set LINK32_backward within
{LINK,PATH,DEMANDA}; set LINK33_backward within {LINK,PATH,DEMANDA}; set
LINK34_backward within {LINK,PATH,DEMANDA};
```

```
set LINK_backward :=
```

```
LINK01_backward union LINK02_backward union LINK03_backward union
LINK04_backward union LINK05_backward union LINK06_backward union
LINK07_backward union LINK08_backward union LINK09_backward union
LINK10_backward union LINK11_backward union LINK12_backward union
LINK13_backward union LINK14_backward union LINK15_backward union
LINK16_backward union LINK17_backward union LINK18_backward union
LINK19_backward union LINK20_backward union LINK21_backward union
LINK22_backward union LINK23_backward union LINK24_backward union
LINK25_backward union LINK26_backward union LINK27_backward union
LINK28_backward union LINK29_backward union LINK30_backward union
LINK31_backward union LINK32_backward union LINK33_backward union
LINK34_backward;
```

```
#Conjunto de Sistemas PDH da Rede
```

```
set PDH;
```

```
#Dados de Demanda Previstas para a Rede:
```

```
param Demanda_a {DEMANDA} >= 0;
```

```
param Demanda_b {DEMANDA} >= 0;
```

```
param Demanda_c {DEMANDA} >= 0;
```

```
param Demanda_d {DEMANDA} >= 0;
```

```
#Dados de Custo dos Sistemas PDH:
```

```
param PDH_Custo {LINK,PDH} >= 0;
```

```
#Dados de Capacidade dos Sistemas PDH e Alfa:
```

param PDH_Capacidade {PDH} >= 0; param ALFA >= 0;

#Variáveis de Decisão:

var xp {i in PATH, j in DEMANDA} >= 0; # Fluxo_Caminho (REAL)

var ye {i in LINK, j in PDH} binary; # Escolha de *link* (BINÁRIA)

var Ye {i in LINK} >=0; # Capacidade total do *link* (REAL)

var fe {i in LINK} >=0; # Ocupação total do *link* (REAL)

#Função Objetivo:

minimize Network_Cost: sum{i in LINK, n in PDH}(PDH_Custo[i,n]*ye[i,n]);

#Restrições de atendimento de demanda. Restrições de limite inferior:

subject to: Down_DEMAND_Routing_Constraint {k in DEMANDA}:

sum {i in PATH} xp[i,k] >= ceil((ALFA/2)*((Demanda_c[k]+Demanda_d[k])/2)+((1-ALFA/2)*((Demanda_a[k]+Demanda_b[k])/2)));

#Restrições de limite superior:

subject to: Up_DEMAND_Routing_Constraint {k in DEMANDA}:

sum {i in PATH} xp[i,k] <= ceil((ALFA/2)*((Demanda_a[k]+Demanda_b[k])/2)+((1-ALFA/2)*((Demanda_c[k]+Demanda_d[k])/2)));

#Restrições de capacidade nos LINKs:

subject to: LINK_Capacitie_Constraint {i in LINK}:

Ye[i]=sum {n in PDH} (PDH_Capacidade[n]*ye[i,n]);

#Restrições de Exclusividade de Modularidade PDH em cada *link*:

subject to: LINK_Module_Constraint {i in LINK}:

sum {n in PDH} ye[i,n] <= 1;

#Restrições de Carregamento do LINK:

subject to: LINK_Load_Constraint {i in LINK}:

sum{(i,j,k) in LINK_forward} xp[j,k] +sum{(i,j,k) in LINK_backward} xp[j,k] = fe[i];

#Restrições de Capacidade do LINK:

subject to: LINK_Capacity_Constraint {i in LINK}:

fe[i] <= Ye[i];

APÊNDICE III

A seguir é apresentado um exemplo de arquivo de saída (solução) para a abordagem arco-caminho (Modelo C5-2) para $\alpha = 1,00$. São listados os valores obtidos para as variáveis do modelo.

Roteamento das demandas pelos caminhos.

xp [*,*]:

	P01	P02	P03	P04	P05	:=
D01	371.5	0	0	0	12.5	
D02	215	0	0	0	0	
D03	212	0	0	0	0	
D04	197	0	0	0	0	
D05	0	56.5	103.5	0	0	
D06	160	0	0	0	0	
D07	144	0	0	0	0	
D08	0	138	0	0	0	
D09	0	124	0	0	0	
D10	0	0	115	0	0	
D11	0	115	0	0	0	
D12	364	0	0	0	0	
D13	0	0	108	0	0	
D14	105	0	0	0	0	
D15	0	95	5	0	0	
D16	0	98	1	0	0	
D17	0	95	0	0	0	
D18	278	0	0	0	0	
D19	266	0	0	0	0	
D20	263	0	0	0	0	
D21	225	0	0	33	0	

```

D22  247  0    0    0    0
D23  237  0    0    0    0
D24   0   104  0   133  0;

```

Sistema escolhido em cada *link*.

ye [*,*]:

PDH01 PDH03 PDH04 :=

```

L01  0  1  0
L02  0  0  0
L03  0  1  0
L04  0  0  0
L05  0  1  0
L06  0  0  0
L07  0  0  0
L08  0  1  0
L09  0  0  0
L10  0  0  0
L11  0  0  0
L12  0  1  0
L13  0  0  0
L14  0  0  0
L15  0  1  0
L16  0  1  0
L17  0  1  0
L18  0  1  0
L19  0  0  0
L20  0  0  0
L21  0  1  0
L22  0  0  0
L23  0  0  0

```

L24 0 0 0
 L25 0 0 0
 L26 0 0 0
 L27 0 0 0
 L28 0 1 0
 L29 0 1 0
 L30 0 0 0
 L31 0 1 0
 L32 0 0 0
 L33 0 1 0
 L34 0 0 0;

Ocupação do *link* alocado.

fe [*] :=

L01 478 L06 0 L11 0 L16 447 L21 362 L26 0 L31 480 L02 0 L07 0 L12
 480 L17 388 L22 0 L27 0 L32 0 L03 434 L08 480 L13 0 L18 443 L23 0
 L28 307 L33 480 L04 0 L09 0 L14 0 L19 0 L24 0 L29 480 L34 0 L05 198
 L10 0 L15 480 L20 0 L25 0 L30 0;

Capacidade do *link* alocado.

Ye [*] :=

L01 480 L06 0 L11 0 L16 480 L21 480 L26 0 L31 480 L02 0 L07 0 L12
 480 L17 480 L22 0 L27 0 L32 0 L03 480 L08 480 L13 0 L18 480 L23 0
 L28 480 L33 480 L04 0 L09 0 L14 0 L19 0 L24 0 L29 480 L34 0 L05 480
 L10 0 L15 480 L20 0 L25 0 L30 0;

ANEXO I

É listado a seguir a planilha 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>	<i>Entre os nós</i>	<i>Custo¹ (\$) – Valor Médio</i>			<i>Link</i>	<i>Entre os nós</i>	<i>Custo¹ (\$) – Valor Médio</i>		
		<i>30 E1</i>	<i>480 E1</i>	<i>1920 E1</i>			<i>30 E1</i>	<i>480 E1</i>	<i>1920 E1</i>
L01	N1-N9	88.933	691.901	1.625.091	L18	N3-N4	70.159	589.043	1.330.671
L02	N1-N10	149.283	988.231	2.498.805	L19	N3-N5	124.638	869.656	2.147.172
L03	N10-N11	59.431	530.267	1.162.431	L20	N3-N6	112.978	813.556	1.980.808
L04	N10-N2	106.353	781.681	1.886.283	L21	N4-N5	103.438	767.656	1.844.692
L05	N10-N3	129.408	892.606	2.215.230	L22	N4-N6	102.643	763.831	1.833.349
L06	N10-N7	185.588	1.162.906	3.016.802	L23	N5-N6	91.168	704.146	1.660.141
L07	N10-N8	164.388	1.060.906	2.714.322	L24	N1-N8	132.588	907.906	2.260.602
L08	N11-N2	94.297	721.289	1.709.211	L25	N5-N7	187.973	1.174.381	3.050.831
L09	N11-N3	114.038	818.656	1.995.932	L26	N5-N8	151.933	1.000.981	2.536.615
L10	N11-N7	190.093	1.184.581	3.081.079	L27	N6-N8	119.603	845.431	2.075.333
L11	N11-N8	164.918	1.063.456	2.721.884	L28	N7-N8	93.403	716.391	1.695.191
L12	N2-N3	84.016	664.962	1.547.981	L29	N9-N10	121.193	853.081	2.098.019
L13	N1-N7	121.988	856.906	2.109.362	L30	N9-N1	130.203	896.431	2.226.573
L14	N2-N4	107.148	785.506	1.897.626	L31	N9-N2	124.638	869.656	2.147.172
L15	N2-N5	139.743	942.331	2.362.689	L32	N9-N6	150.343	993.331	2.513.929
L16	N2-N6	113.773	817.381	1.992.151	L33	N9-N7	125.698	874.756	2.162.296
L17	N2-N8	136.828	928.306	2.321.098	L34	N9-N8	117.218	833.956	2.041.304

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