

Modelo Matemático para o Planejamento de Redes Óticas de Telecomunicação: Um Enfoque nas Redes PON

Edwin Benito Mitacc Meza
emitacc@gmail.com
UFF

Dalessandro Soares Vianna
dalessandrosoares@yahoo.com.br
UFF

Thiago dos Santos
thiago_santos@iconectanetworks.com.br
UFF

Iara Tammela
iaratammela@gmail.com
UFF

Resumo: A crescente necessidade de conexão com a internet e a imensa quantidade de dados que têm trafegado no mundo vem demandando dos provedores de internet serviços de alto desempenho e qualidade. Para atender essa demanda, alguns provedores têm expandido redes óticas visto que suportam maior capacidade de banda, são mais estáveis e eficientes. O objetivo deste projeto foi desenvolver um modelo matemático que servisse de base para o desenvolvimento de uma ferramenta para a otimização de projetos de redes de telecomunicação óticas, que calculasse e gerasse graficamente uma rede otimizada com o menor custo de instalação possível, atendendo a restrições reais do problema e que ainda reduzisse o tempo de desenvolvimento dos projetos. O modelo matemático desenvolvido neste trabalho se mostrou satisfatório para o objetivo principal e contribuiu para o início de um grande trabalho que representará uma considerável redução de custo na elaboração de projetos de redes óticas.

Palavras Chave: Modelo Matemático - Redes Óticas - Redes PON - -

1. INTRODUÇÃO

Nos dias de hoje, a necessidade crescente de conectividade com a Internet vem impondo grandes exigências aos provedores de Internet de pequeno e médio porte, tanto no número de conexões de acesso dos usuários, bem como nos serviços que os usuários requerem em cada conexão. Assim, essas empresas visando se manterem vivas no mercado regional começaram a inovar e iniciar projetos massivos de expansão de redes óticas com alta capacidade de transmissão de dados objetivando agregar uma série de serviços, além do acesso à Internet, como IPTV, VoIP, Vídeo *on demand*, entre outros. Essa maior capacidade de transmissão deve-se à característica das redes óticas, que possibilita levar aos assinantes conexões de banda larga muito mais rápidas e estáveis GIOZZA (1991).

É importante frisar que a maior parte das redes de dados dos provedores de Internet é composta de cabos metálicos constituídos por pares de fios trançados ou cabos coaxiais. O problema para utilização destes cabos é que existe a necessidade de sinais elétricos amplificados em distâncias relativamente curtas, gerando a necessidade de pontos de alimentação de energia elétrica ao longo da rede. Com a redução dos custos de instalação de redes óticas, em virtude do aumento da demanda dos ativos de rede e de cabos óticos, as pequenas empresas provedoras de Internet puderam começar a expandir suas redes óticas em detrimento das redes com par trançado que demandam mais custos de manutenção, reparo e alimentação energética GIOZZA (1991).

Neste cenário, a empresa I-Conecta Networks, uma empresa de telecomunicações situada no Rio de Janeiro, identificou as vantagens em não mais investir em redes metálicas e sim em projetos de expansão de redes óticas. Embora o custo de implementação de uma rede ótica seja um pouco mais cara, ela é estável e demanda pouco esforço de manutenção e reparo, se comparado a uma rede metálica. Assim, com a decisão da empresa de substituir toda sua rede metálica foi criada uma gerência de Projetos de Redes para iniciar os estudos de viabilidade e projetar suas primeiras redes óticas.

Porém, no início das suas atividades e devido a um grande aumento na demanda por projetos de redes, foi identificada pela referida gerência a necessidade de criar alguma ferramenta que, de certa forma, automatizasse os projetos, e que além de dar maior praticidade e rapidez à idealização do projeto, minimizasse os custos de implementação e materiais BREJON (2006).

No caso de uma empresa de pequeno porte, sabe-se da dificuldade de se obter recursos financeiros para realizar investimentos em projetos de custos elevados, como no caso de empresas de telecomunicação. Por isso, cada real economizado no planejamento, no uso de materiais e no tempo de execução desses projetos é vital para que a empresa consiga otimizar seus recursos e ampliar ainda mais sua área de abrangência.

A utilização de ferramentas de Pesquisa Operacional (PO), neste problema, surge como uma alternativa viável para o tratamento da complexidade inerente ao processo de planejamento de redes óticas, pois, por meio do uso destas ferramentas, pode-se representar uma situação do mundo real, estudar seu comportamento (via execução de modelos formais) e tomar decisões com base nas conclusões extraídas.

O objetivo deste trabalho é propor um modelo matemático para o planejamento de redes óticas que busque minimizar os custos associados ao cabeamento da rede bem como ao número de dispositivos usados na configuração da rede, sem descuidar da qualidade do serviço prestado.

Cabe ressaltar que vários aspectos precisam ser otimizados para alcançar o objetivo principal. Dentre eles, o arranjo dos diversos dispositivos que terá a rede, que depende das características da região onde a mesma será instalada e da disposição do cabeamento ótico que, por sua vez, depende da localização dos postes. Outro fator relevante é a localização das caixas de distribuição que precisa ser definida em função do posteamento do local e da densidade de clientes nas proximidades de onde elas serão instaladas. Assim sendo, existe uma série de restrições que precisam ser inter-relacionadas para se realizar a modelagem e, finalmente, obter o produto final que será a projeção da rede e a minimização dos custos do projeto.

O problema em questão pode ser associado a dois problemas clássicos da literatura: o problema de roteirização de veículos – rotas devem ser definidas para a instalação da fibra óptica – e o problema de localização de facilidades – devem ser definidos os locais onde serão instalados os dispositivos. A literatura sobre essas duas classes de problema é vasta, na qual pode-se destacar os seguintes trabalhos: (PISINGER, RØPKE, 2007; FONSECA; FIGUEIRA; RESENDE, 2010; BRESLAU et al., 2011; CORDEAU; LAPORTE; MERCIER, 2011; AVELLA et al., 2012; BLANCHARD; ALOISE; DESARBO, 2012; VIDAL et al., 2012; BELIËNA, 2013; PENNA; SUBRAMANIAN; OCHI, 2013; SUBRAMANIAN; UCHOA; OCHI, 2013).

Alguns trabalhos abordando problemas de telecomunicações também foram pesquisados – dentre eles: (RESENDE; PARDALOS, 2006; CHANG; QU; ZHENG, 2012; RESENDE, 2012). No entanto, não foi encontrado nenhum trabalho com as especificidades do problema abordado no presente estudo.

Na Seção 2 é feita uma descrição do problema tratado. Na Seção 3 é apresentado o modelo matemático proposto. Já na Seção 4 são mostrados os testes computacionais para validação do modelo, e por último a Seção 5 apresenta as conclusões e trabalho futuros.

2. DESCRIÇÃO E DELIMITAÇÃO DO PROBLEMA

Para melhor definir o problema estudado e delimitar o escopo do presente trabalho, será apresentado com maiores detalhes todo o processo, bem como algumas especificidades, para a elaboração dos projetos de redes óticas pela I-Conecta Networks, utilizadas para transmitir os serviços de telecomunicação, como TV, VoIP e Internet.

Para cada projeto é feito um levantamento prévio estimado da quantidade de materiais necessários para a programação de compra de forma a não atrasar o cronograma pré-estabelecido.

No caso da empresa em questão, a tecnologia utilizada para a transmissão de dados de voz e TV é o GEPON (*Giga Ethernet PON*). Na sua topografia são utilizados dois ativos, a OLT (*Optic Line Terminal*) e a ONU (*Optic Network Unit*) ou ONT (*Optic Network Terminal*), com capacidade de transmissão teórica de 1,25 Gbps (Gigabit por segundo), GIRARD (2005).

A questão de otimização da rede entra nas restrições existentes para o perfeito funcionamento da rede ótica. Basicamente, para que a rede funcione tanto a ONU quanto a OLT precisa-se receber o sinal ótico que é transmitido por cada uma. A OLT, por padrão ITU-T emite o sinal ótico com 4 dBm (decibel miliwatt) de potência ótica e a ONU tem sensibilidade de receber o sinal em até -26 dBm. Ou seja, $26 + 4 = 30$ dBs (decibéis) é o que temos para “perder” ou ser atenuado, pode ser descrito como “o nosso *power budget*” (orçamento de potência). Além das perdas que serão detalhadas mais a frente, é necessário deixar uma margem de segurança, em média 10% do orçamento total, ou 3 dBs. Esse valor serve de reserva para compensar a perda de potência que os ativos podem ter ao longo de sua

vida útil, e o aumento da atenuação na própria fibra causada pelo envelhecimento e exposição ao tempo, mesmo o cabo possuindo diversas camadas de proteção.

Os fabricantes de fibra e a própria norma IEEE sugerem que sejam alocados no máximo 64 clientes para garantir o padrão de qualidade tanto devido a capacidade de transmissão da tecnologia (dividindo 1,25 Gbps por 64 tem-se aproximadamente 20 Mbps por cliente) quanto também devido a restrição do *power budget* LAFERRIÈRE (2011).

As atenuações, que são as perdas de potência, são causadas pela absorção da própria fibra, por fusões, conectorizações ou emendas mecânicas e principalmente devido à divisão ótica nas mais diversas possibilidades. E é na configuração do posicionamento dos *splitters* que se pode otimizar a rede e deixar cada terminal de cliente (ONU) com potência homogênea ou dentro de uma faixa de potência final, por exemplo entre -20 e -21 dBm. Dessa forma, obtém-se uma reserva mínima de 5 dB, o que possibilita no futuro dividir mais uma vez de 1 para 2, e ainda permanecer dentro do *power budget*.

Para exemplificar, segue um modelo (Figura 1) utilizado num projeto a ser executado num dos bairros da cidade de Rio das Ostras. Os quadrados azuis com a inscrição “1/8” representam um *splitter* de 1/8 (que também poderia ser 1/2, 1/4, 1/16, 1/32, 1/64), que são instalados nas caixas de conectorização, de onde, a partir de cada saída do *splitter*, partirá uma fibra em um cabo até a localização do assinante, onde ficará instalada a ONU ou ONT, os quais poderão prover serviços de dados, IPTV e/ou VoiP.

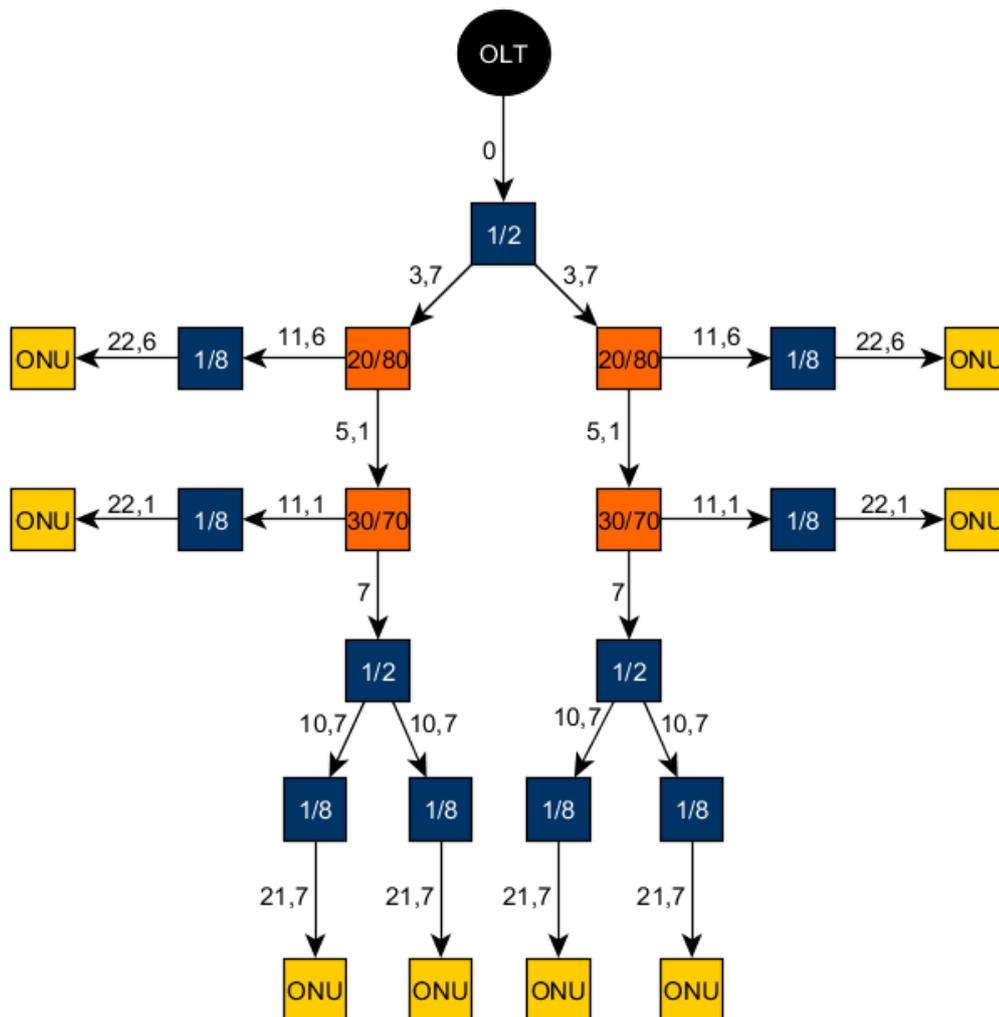


Figura 1: Diagrama de *splitagem* de uma fibra para uma OLT do projeto exemplificado.

Cabe ressaltar que na Figura 1 são também mostradas as atenuações por *splitagem*, localizadas nas setas da figura. Estes valores são baseados nas Tabelas 1 e 2 que mostram as atenuações padrões dos *splitters* que são comumente utilizados na configuração das redes óticas projetadas na empresa. Os valores das tabelas são os máximos aceitáveis para cada tipo de *splitter* e na realidade, depois de instalados, apresentam, na maioria das vezes, valores inferiores aos das tabelas.

Tabela 1: Perdas em *Splitters* Desbalanceados.

Modelos de Splitter	1/99	2/98	5/95	10/90	15/85	20/80	25/75	30/70	35/65	40/60	45/55
Banda Óptica Passante	1260~1360 e 1480~1650nm										
Perda de Inserção Máxima	21,6 dB	18,7 dB	14,6 dB	11,0 dB	9,6 dB	7,9 dB	6,95 dB	6,0 dB	5,35 dB	4,7 dB	4,15 dB
	0,30 dB	0,4 dB	0,5 dB	0,7 dB	1,0 dB	1,4 dB	1,7 dB	1,9 dB	2,3 dB	2,7dB dB	3,15 dB

Fonte: Especificação Técnica do Fabricante. FURUKAWA (2013).

Tabela 2: Perdas em *splitters* balanceados.

Modelos	1x2	1x4	1x8	1x16	1x32	1x64
Banda Óptica Passante	PLC: 1260~1650		FBT:1260~1360nm e 1480~1650nm			
Perda de Inserção Máxima(Desconsiderar Perdas das Conexões)	3,7dB	7,1dB	10,5dB	13,7dB	17,1dB	20,5dB
Uniformidade	0,5 dB	0,6 dB	1,0 dB	1,3 dB	1,5 dB	1,7 dB
Sensibilidade à Polarização Máxima (PDL)	0,2 dB	0,2 dB	0,25dB	0,3 dB	0,4 dB	0,5 dB
Diretividade	>55 dB					
Perda de Retorno	>55 dB					

Fonte: Especificação Técnica do Fabricante. FURUKAWA (2013).

Na Tabela 1, na linha Perda de Inserção Máxima, o primeiro número é a perda na saída onde passa menos potência, conseqüentemente a perda é maior. Já o segundo número, representa a perda da saída onde passa mais potência e pelo raciocínio, a perda é menor.

As saídas desses *splitters* ficam conectadas em adaptadores dentro de uma caixa de conectorização, que leva esse nome, pois é, onde se faz a conectorização do cabo do assinante com uma das saídas do *splitter*. Algumas empresas ao invés de fazerem a conectorização no cabo do cliente fazem fusão. A diferença está na agilidade, pois na conectorização não há necessidade do técnico transportar equipamentos caros na ordem de milhares de dólares, além de o processo ser mais rápido e não precisar descer a caixa que fica presa no alto do poste até o solo para realizar a fusão. A desvantagem é que na conectorização há maior perda que na fusão. Na fusão há perda de 0,01dB, já na conectorização no mínimo 0,25dB, se bem feita. Além das atenuações dos *splitters*, também há atenuação da luz nas emendas mecânicas ou conectorizações, fusões e no próprio material da fibra, ANRITSU (2005).

Como foi dito anteriormente, um dos objetivos específicos desse estudo é gerar a configuração dos *splitters* na rede de forma a diminuir a atenuação total até o assinante. Juntamente com essa solução, também se busca a otimização da localização das caixas de distribuição, de maneira que as caixas de distribuição fiquem o mais próximo possível dos assinantes. Essa otimização visa encontrar um ponto ótimo entre o custo da infraestrutura de rede por cliente e o custo da instalação final do cliente.

Na Figura 2 é apresentado um projeto de rede onde se utiliza a configuração de *splitagem* da Figura 1. No mapa há a localização das caixas e o percurso dos cabos óticos representados por linhas coloridas. Cada cor representa uma OLT diferente. Cada OLT utiliza uma das fibras do cabo ótico.

Na Figura 2, os pontos pretos representam postes e as caixas de distribuição são representadas pelas iniciais CC (caixa de conectorização) com uma numeração sequencial.

Para dar dimensões de custos do projeto apresentado anteriormente, tem que ser levado em conta a quantidade e os custos dos equipamentos a serem empregados no projeto, bem como os custos de instalação, este último varia em função da distância entre a caixa de conectorização e o assinante INFORTEL (2013). Cabe ressaltar que os principais itens que influenciam no aumento do custo de instalação são o cabo ótico e mão de obra. Os outros itens são fixos, como por exemplo: conjunto para ancoragem dos cabos, caixa de emenda ótica, etc.

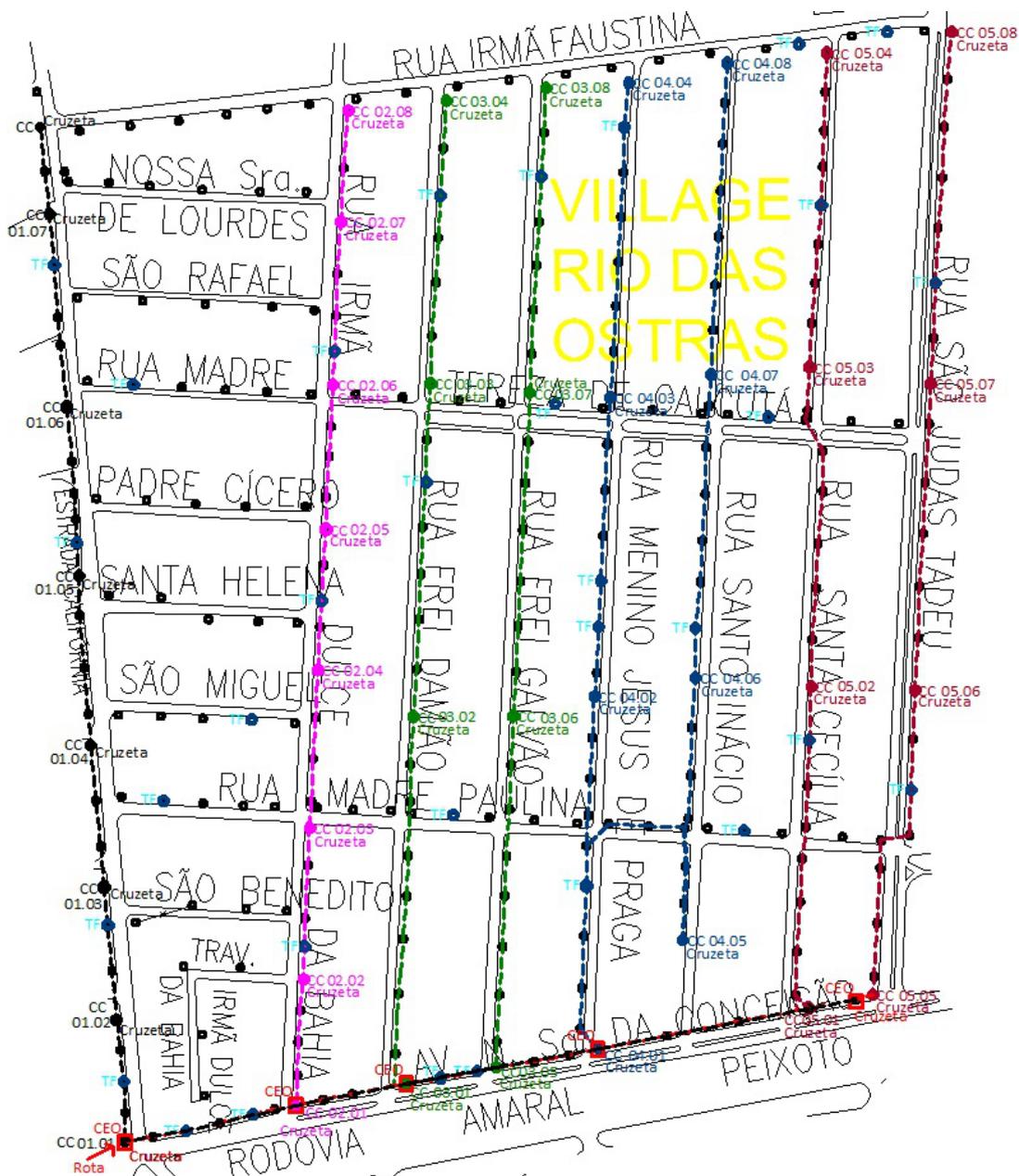


Figura 2: Mapa com percurso feito pelos cabos óticos.

3. FORMULAÇÃO E MODELAGEM MATEMÁTICA DO PROBLEMA

O problema, aqui tratado, pode ser representado por um grafo não direcionado $G(V, A)$, onde $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ é o conjunto de todos os vértices e $E = \{(v_i, v_j): v_i, v_j \in V\}$ é o conjunto de todas as arestas, BODIN (1981) e BODIN (1983). Os vértices representam clientes ou postes. Cada poste pode suprir vários clientes simultaneamente, dependendo do tipo de *splitter* instalado. Neste trabalho supõe-se que existe um número limitado de clientes e postes.

A cada aresta (v_i, v_j) está associada uma distância não negativa d_{ij} que representa a distância entre os vértices (clientes/postes).

O Problema do planejamento de redes óticas consiste em determinar como será feita o cabeamento, ou seja, por onde deverá passar o cabo ótico, e determinar onde e que tipo de *splitters* será instalado, de forma a minimizar os custos respeitando os requisitos mínimos de qualidade.

Assim, para formular matematicamente este problema se devem definir os seguintes parâmetros e variáveis de decisão:

Parâmetros:

d_{ij} = comprimento do caminho entre os nós (clientes/postes)

CA_k = custo do splitter tipo k

SA_k = número de saídas do splitter tipo k

PA_{ks} = perda do splitter k na saída s

CC = custo do cabo por unidade de distância

LIM = limite máximo de perda no cliente

V = conjunto de todos os vértices

A = conjunto de todas as arestas

B = elemento de V que representa a fonte do sinal

C = subconjunto de V que representa os clientes

P = subconjunto de V que representa os postes

K = conjunto de todos os tipos de splitters

S = conjunto de todas as possíveis saídas de um splitter

M = número muito grande

Variáveis de decisão:

$a_{ik} = \begin{cases} 1 & \text{indica que o splitter } k \text{ esta associado ao vértice } i \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases}$

$x_{ijs} = \begin{cases} 1 & \text{indica que a aresta } (i, j) \text{ está sendo usada pela saída } s \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases}$

y_{ij} = fluxo entre i e j

z_{ijs} = perda de sinal saindo do vértice i para o vértice j pela saída s

$u_i = \begin{cases} 1 & \text{indica que o vértice } i \text{ esta sendo usada} \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases}$

Utilizando esta notação, o problema pode ser formulado como um modelo de programação inteira mista:

$$\text{MIN} \sum_{i \in V} \sum_{j \in V} \sum_{s \in S} x_{ijs} d_{ij} CC + \sum_{i \in V} \sum_{k \in K} a_{ik} CA_k \quad (1)$$

s.a.

$$u_B = 1 \quad B \in V \quad (2)$$

$$u_i = 1 \quad \forall i \in C \quad (3)$$

$$\sum_{i \in V} y_{ij} - \sum_{i \in V} y_{ji} = u_j \quad \forall j \in V / j \neq B, (i, j) \in A \quad (4)$$

$$y_{ij} \leq M \sum_{s \in S} x_{ijs} \quad \forall i \in V, \forall j \in V / (i, j) \in A \quad (5)$$

$$2 \sum_{s \in S} x_{ijs} \leq u_i + u_j \quad \forall i \in V, \forall j \in V / (i, j) \in A \quad (6)$$

$$\sum_{i \in V} x_{jis} \leq 1 \quad \forall j \notin C, \forall s, (j, i) \in A \quad (7)$$

$$\sum_{j \in V} \sum_{s \in S} x_{Bjs} = 1 \quad j \neq B \quad (8)$$

$$\sum_{i \in V} \sum_{s \in S} z_{Bis} = 0 \quad \forall i / (B, i) \in A \quad (9)$$

$$\sum_{i \in V} \sum_{s \in S} z_{ijs} \leq LIM \quad \forall j \in C, (i, j) \in A \quad (10)$$

$$\sum_{i \in V} z_{jis} \geq \left(\sum_{i \in V} \sum_{t \in S} z_{ijt} \right) + PA_{ks} - M(1 - a_{jk}) \quad \forall k, \forall j \notin C / j \neq B, (i, j) \in A, \forall s \leq SA_k \quad (11)$$

$$z_{ijs} \leq M x_{ijs} \quad \forall i \in V, \forall j \in V / (i, j) \in A \quad (12)$$

$$\sum_{i \in V} \sum_{s \in S} x_{jis} \leq M(1 - a_{jk}) \quad \forall k, \forall j / (j, i) \in A, \forall s > SA_k \quad (13)$$

$$\sum_{k \in K} a_{jk} = u_j \quad \forall j \notin C \quad (14)$$

$$x_{ijs} = 0 \quad \forall i \in C, \forall j \in V, (i, j) \in A, \forall s \in S \quad (15)$$

$$\sum_{j \notin C} \sum_{s \in S} x_{jis} = 1 \quad \forall i \in C, (i, j) \in A \quad (16)$$

$$x_{ijs} \in [0, 1] \quad \forall i \in V, \forall j \in V, (i, j) \in A, \forall s \in S \quad (17)$$

$$a_{ik} \in [0, 1] \quad \forall i \in P, \forall k \in K \quad (18)$$

$$u_i \in [0, 1] \quad \forall i \in V \quad (19)$$

$$y_{ij} \geq 0 \quad \forall i \in V, \forall j \in V, (i, j) \in A \quad (20)$$

$$z_{ijs} \geq 0 \quad \forall i \in V, \forall j \in V, (i, j) \in A, \forall s \in S \quad (21)$$

O objetivo (1) é minimizar a soma dos custos associados aos cabos e aos tipos de splitters instalados. A equação (2) garante que a fonte do sinal deve ser usada e a equação (3) que todo cliente deve ser atendido. A restrição (4) assegura a conservação de fluxo. A desigualdade (5) garante que só pode haver fluxo se a aresta (i,j) estiver sendo usada. Analogamente, a desigualdade (6) garante que se a aresta (i,j) esta sendo usada, os vértices i,j devem ser parte da solução. A restrição (7) assegura que para todo vértice “não cliente” cada

saída é usada no máximo uma vez. A equação (8) é introduzida para garantir que o nó fonte deve estar ligado a apenas um único vértice. Já a equação (9) assegura que não existe perda na fonte do sinal. Para garantir a qualidade do serviço aos clientes, a desigualdade (10) é introduzida para que a perda no cliente seja menor que o limite permitido. Da mesma forma, a desigualdade (11) garante que a perda em cada saída do splitter estará de acordo com as especificações deste. A restrição (12) assegura que só pode haver qualquer sinal (perda) se a aresta estiver sendo usada. Já a desigualdade (13) garante que não pode haver sinal (perda) em saídas que o splitter não tem. Devido à equação (14) tem que haver um splitter por vértice “não cliente” usado, por isso, a necessidade de um splitter fictício que representa um suporte dielétrico. A equação (15) assegura que um nó cliente é um nó terminal, ou seja, não existem conexões a partir dele. Um nó cliente tem que estar ligado a um nó que não seja cliente, o que é garantido pela equação (16). O domínio adequado das variáveis é determinado pelas restrições (17), (18), (19), (20) e (21)..

4. TESTES COMPUTACIONAIS

4.1. APRESENTAÇÃO DOS CENÁRIOS DE TESTES

Inicialmente foi feito um levantamento de dados em campo para projeto de uma rede ótica em um bairro da cidade de Rio das Ostras. Foram levantados mais de 300 postes por onde passarão os cabos óticos e onde serão instaladas as caixas de conectorização. Depois de levantado a localização geográfica de cada poste foi criada uma planilha Poste × Poste para determinar quais postes se conectavam entre si. A terceira etapa foi identificar a localização geográfica dos clientes no mapa para que o modelo atendesse a 100% dos assinantes de acordo com a densidade, e não homogeneamente.

No entanto devido ao tamanho do projeto, e da quantidade de variáveis geradas para que fosse feito o cálculo computacional, não foi possível trabalhar os dados reais, sendo necessário simular cenários hipotéticos para a realização dos testes.

Os cenários foram gerados a partir de um pequeno aplicativo, nomeado PlanRede, desenvolvido no software DELPHI 7.0, que utiliza a linguagem de programação object pascal e tem suporte à programação visual. Este aplicativo é alimentado por um arquivo de entrada, contendo os dados para gerar um cenário teste, e fornece uma interface para a interpretação da solução obtida pelo LINGO, software usado na solução do modelo matemático. A interface do aplicativo desenvolvido no DELPHI 7.0 é representada na Figura 3.



Figura 3: Interface com usuário do aplicativo PlanRede.

Os dados para o arquivo de entrada são: Número de clientes, número de clientes por rua, número de postes por rua, valor da unidade do cabo de fibra ótica, perda máxima até o cliente, número máximo de saídas dos splitters, quantidade diferente de splitters e especificação de cada splitter.

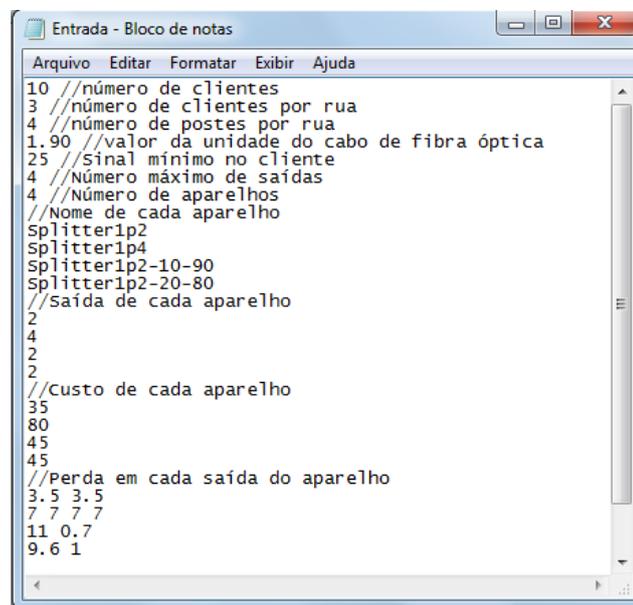
É importante ressaltar que para cada cenário a ser analisado os dados de entrada são modificados. Na criação dos cenários, inicialmente, foi se criando modelos mais simples, e depois se partiu para os mais complexos para analisar o desempenho do sistema computacional utilizado. Quanto maior a quantidade de clientes e postes, mais complexos se tornam os cálculos.

Para gerar os cenários, foram gerados arquivos ‘.txt’ com os dados para que o aplicativo gerasse o cenário graficamente. No PlanRede, é gerado um arquivo contendo o modelo matemático que será executado no LINGO 10. Este último finalmente roda o modelo até encontrar a solução ótima. Quando a solução é encontrada, ele gera dois outros arquivos de saída que são carregados novamente no PlanRede para mostrar graficamente a solução ótima gerada.

Foram escolhidos alguns cenários no qual o sistema conseguiu gerar a solução ótima, e outros que devido ao aumento da complexidade do cenário e ao tempo necessário de processamento, não foi obtido uma solução ótima. A seguir descreve-se um cenário teste.

Cenário Teste:

Neste cenário, foram considerados os dados descritos na Figura 4, onde temos 10 clientes e 4 tipos de aparelhos (*splitters*) com diferentes números de saída.



```

10 //número de clientes
3 //número de clientes por rua
4 //número de postes por rua
1.90 //valor da unidade do cabo de fibra ótica
25 //Sinal mínimo no cliente
4 //Número máximo de saídas
4 //Número de aparelhos
//Nome de cada aparelho
Splitter1p2
Splitter1p4
Splitter1p2-10-90
Splitter1p2-20-80
//Saída de cada aparelho
2
4
2
2
//Custo de cada aparelho
35
80
45
45
//Perda em cada saída do aparelho
3.5 3.5
7 7 7 7
11 0.7
9.6 1
    
```

Figura 4 – Arquivo com os dados de entrada para criação do cenário teste.

Para os dados contidos na Figura 4, foi gerado o modelo matemático no aplicativo PlanRede, que depois de processado pelo LINGO 10.0 e novamente carregados os resultados no PlanRede, foi gerada a solução gráfica conforme Figura 5.

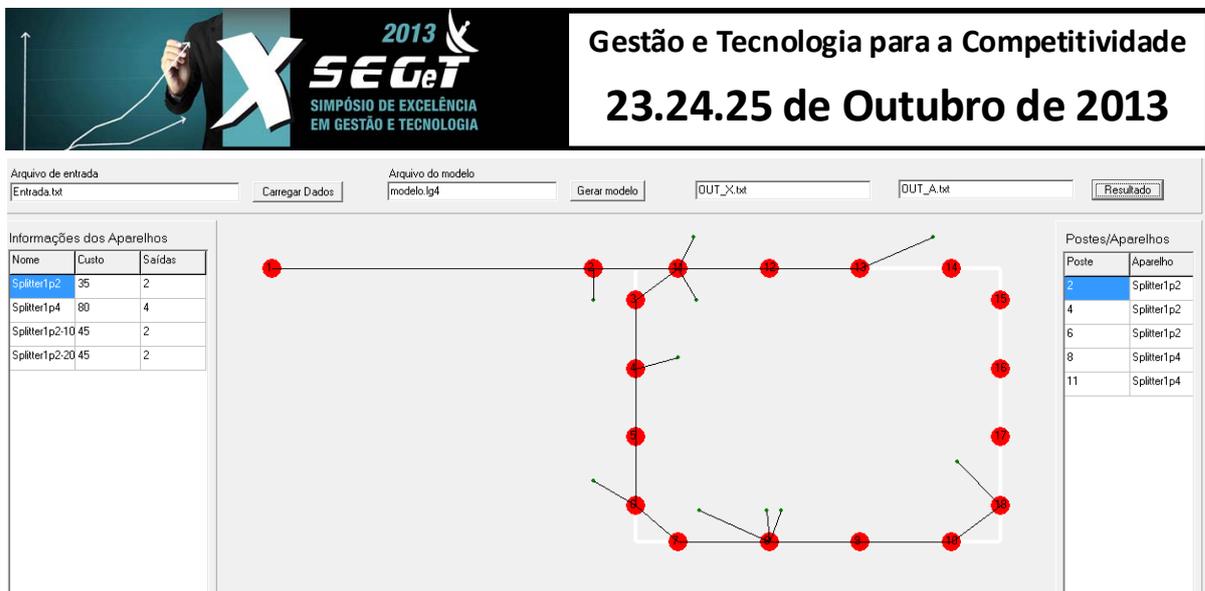


Figura 5 – Solução alcançada pelo Lingo 10.0 para o cenário teste.

Cabe ressaltar, que os círculos vermelhos numerados são os postes, as linhas brancas as ruas e os pontos pretos pequenos a localização dos assinantes. A solução mostra graficamente em que postes ficarão instalados os *splitters*, de onde partirão os cabos *drops* até os assinantes, e o percurso que o cabeamento deve percorrer passando por cada poste.

4.2. RESULTADOS

A Tabela 3 apresenta um resumo dos testes apresentados. Nela pode-se observar que para os quatro primeiros cenários apresentados o sistema conseguiu gerar resultados com as soluções ótimas. No entanto, quando alguns dos dados de entrada começaram a ficar maiores, o sistema não conseguiu gerar soluções ótimas em tempo hábil, conforme os Cenários 5 e 6.

Tabela 3: Relação das siglas e áreas temáticas do *SEGeT*.

Cenário	Quantidade de Clientes	Tempo de Processamento	Número de iterações	Resultado (Custo do Projeto)
1	12	1min20s	420485	1355,57
2	13	14min59s	7535051	1479,11
3	10	25min47s	11944949	1827,98
4	16	3h28min45s	40010329	1478,87
5	20	6h14min23s	80653216	Solução não encontrada
6	24	12h00min25s	233413361	Solução não encontrada
7	180	0	0	Solução não encontrada

Além disso, quando tentou-se criar cenários de maior porte, para tentar mostrar um modelo mais próximo do tamanho real dos projetos realizados na prática, o LINGO 10.0 não conseguiu gerar uma solução ótima. O cenário 7 foi um caso onde aconteceu esse problema e constatou que não é viável a solução de problemas através desse tipo de modelagem matemática usando o LINGO 10.0.

5. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho foi motivado e inspirado no desenvolvimento de projetos de redes óticas numa empresa de telecomunicação. A proposta para o projeto foi a otimização dos recursos utilizados nas expansões de redes óticas. Seu objetivo foi criar um modelo matemático que gerasse, a partir de dados de entrada como a localização de postes e clientes, custos de equipamentos e restrições dos equipamentos, uma solução ótima com a minimização dos custos dos projetos.

Como etapa inicial foi delimitado o problema, considerando as principais restrições do problema. Foram colhidas informações em campo para servirem como dados de entrada. No entanto, devido ao tamanho do problema e do grande número de variáveis e de restrições, foi

necessário utilizar simulações de projetos com rede menores que os projetos realizados na prática.

Então para realizar simulações em problemas com menor área de atendimento, e consequentemente menor quantidade de clientes foi desenvolvido um aplicativo em DELPHI 7, chamado PlanRede, para que fossem gerados os modelos matemáticos a partir de cenários criados a partir de alguns dados de entrada. Esses modelos eram processados no aplicativo LINGO 10.0 para que fosse encontrada a melhor solução para os cenários que eram gerados no PlanRede.

Foram realizadas simulações para diversos cenários diferentes. Na análise dos cenários pode-se constatar que o modelo matemático proposto atende às necessidades do problema com as restrições consideradas. Entretanto, para cenários de maior porte de área e número de clientes, ele não se aplicou.

Com isso o modelo matemático e a aplicação desenvolvida não se aplicaram para projetos reais, já que os projetos desenvolvidos na prática são em torno de 100 vezes maiores que os cenários que obtiveram solução ótima.

Como nesse trabalho, em virtude da complexidade do problema, não ter sido possível contemplar todas as variáveis, e também não conseguir resultados para uma quantidade real de clientes ou uma área geográfica de maior porte que abrigue acima de 500 clientes, um outro método de solução do modelo matemático precisa ser desenvolvido para que seja possível encontrar soluções em menor tempo. Como proposta, para encontrar uma solução para cenários reais de grande porte, deverão ser desenvolvidas heurísticas para abordar este tipo de problemas.

6. REFERÊNCIAS

- ANRITSU COMPANY, FTTx Resource Guide, Deploying and Maintaining Reliable and Low Cost Service Networks. Richardson – Texas – USA, 2010.
- AVELLA, P., BOCCIA, M., SALERNO, S., VASILYEV, I. An aggregation heuristic for large scale p-median problem. *Computers & Operations Research*, v. 39, n. 7, 1625–1632, 2012.
- BELIËNA, J., BOECKA, L., COLPAERTA, J., DEVESSEC, S., VAN DEN BOSSCHEA, F. Optimizing the facility location design of organ transplant centers. *Decision Support Systems*, v. 54, n. 4, 1568–1579, 2013.
- BLANCHARD, S. J., ALOISE, D., DESARBO, W. S. The Heterogeneous P-Median Problem for Categorization Based Clustering. *Psychometrika*, v. 77, n. 4, 741-762, 2012.
- BODIN, L., GOLDEN, B. L., ASSAD, A., BALL, M., Routing and Scheduling of vehicles and crews: The State of the art. *Computers and Operations Research*, v. 10, n. 2, 1983.
- BODIN, L., GOLDEN, B., Classification in vehicle routing and scheduling. *Networks*, v. 11, n. 2, , 1981.
- BREJON, S. R. C., BELFIORE, P. P., FÁVERO, L. P. L., Enfoque Sistêmico para Tomada de Decisões em Problemas de Roteirização de Veículos. XIII SIMPEP – Bauru-SP-Brasil, 2006.
- BRESLAU, L., DIAKONIKOLAS, I., DUFFIELD, N. GU, Y., HAJIAGHAYI, M. T., JOHNSON, D. S., KARLOFF, H., RESENDE, M. G. C., SEN, S. Disjoint-path facility location: Theory and practice. *Proceedings of the Thirteenth Workshop of Algorithm Engineering and Experiments (ALENEX11)*, SIAM, San Francisco, 60-74, 2011.
- CHANG, H. J., QU, G., ZHENG, S. Q. A high-performance switch architecture based on mesh of trees. *International Journal of Communication Systems*, John Wiley & Sons , 1099-1131, 2012.
- CORDEAU, J. F., LAPORTE, G., MERCIER, A. A unied tabu search heuristic for vehicle routing problems with time windows. *Journal of the Operational Research Society*, v. 52, 928-936, 2011.
- FONSECA, M., FIGUEIRA, J. R., RESENDE, M. G. C. Solving scalarized multi-objective network flow problems with an interior point method. *International Transactions in Operational Research*, v. 17, 607-636, 2010.



FURUKAWA, 2013, disponível no site <http://www.furukawa.com.br>, acessado em 01/03/2013.

GIOZZA, W. F. Fibras ópticas: Tecnologia e Projeto de Sistemas, São Paulo, SP: Makron/McGraw-Hill, 1991.

GIRARD, A. FTTx PON Technology and Testing, a detailed review of systems performances, issues and testing solutions. EXFO – Electric-Optical Engineering Inc. Quebec, Canadá, 2005.

LAFERRIÈRE, J., LIETAERT, G., TAWS, R. E WOLSZCZAK, S., Reference Guide to fiber Optic Testing. 2ª Edição, v. 1, 2011.

INFORTELECOM, disponível na página <http://www.infortelecom.com.br/?wpsc-product=grampo-de-ancoragem-dieletrico-ratinho>, acessado em 01/03/2013, 2013.

PENNA, P. H. V., SUBRAMANIAN, A., OCHI, L. S. An Iterated Local Search heuristic for the Heterogeneous Fleet Vehicle Routing Problem. Journal of Heuristics, v. 19, n. 2, 201-232, Springer, 2013.

PISINGER, D. RØPKE, S. A general heuristic for vehicle routing problems. Computers & Operations Research, v. 34, n. 8, 2403-2435, 2007.

RESENDE, M. G. C. Biased random-key genetic algorithms with applications in telecommunications. TOP, v. 20, 120-153, 2012.

RESENDE, M. G. C., PARDALOS, P. M. Handbook of Optimization in Telecommunication. Springer Science + Business Media, 2006.

SUBRAMANIAN, A., UCHOA, E., OCHI, L. S. A Hybrid Algorithm for a Class of Vehicle Routing Problems. Computers & Operations Research, v. 40, 2519-2531, Elsevier, 2013.

VIDAL, T., CRAINIC, T. G., GENDREAU, M., LAHRICHI, N., REI, W. A hybrid genetic algorithm for multi-depot and periodic vehicle routing problems. Operations Research, v. 60, n. 3, 611-624, 2012.