



OTIMIZAÇÃO MULTI-NÍVEL PARA PROJETO DE REDES DE ACESSO PARA IMPLEMENTAÇÃO DE CIDADES INTELIGENTES

**Márcio Joel Barth, Leandro Mengue, José Vicente Canto dos Santos, Marcelo Josué Telles,
Jorge Luis Victória Barbosa**

Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS
Av. Unisinos, 950 Bairro Cristo Rei, São Leopoldo - RS
marcio-barth@procergs.rs.gov.br, leandro@mengue.com.br,
jvcanto@unisinos.br, marcelojtelles@gmail.com,
jbarbosa@unisinos.br

RESUMO

Estudos sobre infraestrutura de redes têm sido realizados e aplicados em várias indústrias de serviços e mais recentemente para atendimento das necessidades de infraestrutura de cidades inteligentes. Entretanto, o planejamento de infraestrutura de redes em vários níveis, é um problema em aberto, pois, geralmente, a literatura apresenta soluções nas quais somente um nível é processado e os problemas são solucionados de forma individual. O planejamento da distribuição e conexão de equipamentos em vários níveis de uma infraestrutura de rede é uma tarefa árdua, pois é necessário avaliar a quantidade e a melhor distribuição geográfica de equipamentos em cada nível da rede. Esta pesquisa apresenta uma metaheurística inspirada nos conceitos dos algoritmos genéticos, capaz de procurar por uma solução para o planejamento de infraestrutura de redes multiníveis capacitadas, resolvendo o problema de planejamento de redes obtendo resultados melhores na ordem de 20% no custo da solução quando comparados com outras soluções.

PALAVRAS CHAVE. Planejamento de redes, Algoritmo multinível capacitado, Cidades inteligentes.

TEL&SI - PO em Telecomunicações e Sistemas de Informações, OC - Otimização combinatorial, MH - Metaheurísticas

ABSTRACT

Studies of network infrastructure have been used and applied in various service industries and more recently to meet the smart cities infrastructure needs. However, network infrastructure planning at various levels is an open problem because generally, the literature presents solutions in which only one level is processed and the problems solved individually. Planning the distribution and connection of equipment at various levels of a network infrastructure is an arduous task it is necessary to evaluate the quantity and the best geographical distribution of equipment at each level of the network. This research presents a metaheuristic inspired by the concepts of the genetic algorithms, capable to search for a solution for the planning of infrastructure of capacitated multilevel networks, solving the problem of network planning obtaining better results in the order of 20% in the cost of the solution when compared with other solutions.

KEYWORDS. Network planning. Multilevel capacitated algorithm. Smart cities.

TEL&SI - OR in Telecommunications and Information Systems, OC - Combinatorial Optimization, MH - Metaheuristics



1. Introdução

A globalização, a urbanização e a industrialização têm sido reconhecidas como três grandes propulsores que conduzem a civilização humana no século 21. De acordo com a OECD aproximadamente 70% da população do mundo em breve viverá em áreas urbanas. Neste contexto muitas cidades têm criado iniciativas para se tornarem mais inteligentes em termos funcionais, adotando a TIC - Tecnologia da Informação e Comunicação (ICT do inglês *Information and Communication Technology*) como forma de revitalizar as oportunidades econômicas e para reforçar a sua competitividade global, em consequência disponibilizando maior conforto aos seus habitantes. As tecnologias visam facilitar a realização de tarefas rotineiras, oferecer novos serviços, automatizar ações, promover melhorias no cotidiano dos indivíduos e na administração das cidades. O grande desafio que surge é qual infraestrutura irá suportar toda a conectividade necessária para disponibilizar as informações aos diversos serviços, pois uma grande rede de "coisas" deverá ser formada e ainda teremos uma grande "nuvem das coisas" para armazenar todas as informações geradas. Assim as redes de comunicação de dados tem se tornado tão importantes quanto outros serviços, como fornecimento de energia elétrica e água para os usuários, dando a sensação que este serviço deve estar disponível da mesma forma que se aciona o interruptor para ligar uma lâmpada. Desta forma, as redes de comunicação de dados precisam ter a mesma capilaridade que as redes de energia elétrica, por exemplo, para poder atender aos usuários da mesma forma. Além disso, com a crescente demanda para conexão de diversos tipos de dispositivos em rede como a implementação de *Smart Grid*, *IoT* e *Smart City* [Petrolo et al., 2014], [Piro et al., 2014], [Sukode et al., 2015], é requerido um planejamento maior para poder disponibilizar o acesso a redes de comunicação da melhor forma e a um custo apropriado.

Na literatura já existem diversos trabalhos [Chiu e Lin, 2004], [Watcharasitthiwat e Wardkein, 2009], [Varvarigos e Christodouloupoulos, 2014], [Monteiro et al., 2015] a respeito da melhor aplicação de métodos para a elaboração de projetos de redes de forma isolada, porém o intuito deste trabalho é o de projetar o sistema de forma integrada a fim de prover acesso a rede de comunicação de dados aos diversos habitantes/consumidores/serviços de uma cidade inteligente (*Smart City*) conectando diversos tipos de dispositivos como sensores, *Smart Grid*, consumidores finais, otimizando o melhor custo para instalação da rede. Assim, o objetivo deste artigo é o de apresentar um método computacional para o projeto de redes de acesso para resolução do problema de projeto de redes explorando a técnica conhecida como o problema da árvore geradora mínima capacitada multinível (*MCMST* do inglês *Multilevel Capacitated Minimum Spanning Tree*). Este artigo está dividido em seis seções. A seção 2, discute conceitos básicos e topologias que servem como base para o desenvolvimento deste artigo. Na seção 3 são discutidos o problema alvo e a metodologia proposta para resolução do problema e em seguida é apresentada a metodologia de condução dos experimentos na seção 4. Os testes e resultados são apresentados na seção 5 e como fechamento do artigo é apresentado na seção 6 a conclusão.

2. Conceitos Básicos

2.1. Cidades Inteligentes

Cidades certamente são as maiores construções sociais da humanidade, não apenas devido a sua complexidade, mas por sua capacidade de aproximar pessoas e facilitar o encontro de interesses comuns. Os problemas das cidades são conhecidos, muitas vezes multidisciplinares e de solução complexa. Problemas ligados ao atendimento de demandas relacionadas a educação, saúde, mobilidade urbana e saneamento, entre outras, podem ser listados como prioridades dos gestores públicos e foco das empresas envolvidas na formatação e gestão de soluções para os ambientes urbanos.

Os autores do trabalho [Lee et al., 2013] sugerem uma proposta de modelo para análise de cidades inteligentes que é listada a seguir: governo aberto, inovação de serviços, formação de parcerias, proatividade urbana, governança da cidade inteligente e integração da infraestrutura da



cidade inteligente. Este último tópico vai de encontro ao objetivo desta pesquisa, pois trata especificamente a infraestrutura de TIC para apoiar as iniciativas da cidade inteligente, propiciando uma rede de comunicação de alta velocidade, proporcionando a conectividade de diversos dispositivos complementares.

2.1.1. Exemplos de Necessidade de Conectividade nas Cidades Inteligentes

A ideia de um projeto de rede de acesso para cidades inteligentes do ponto de vista da TIC é o de oferecer aos cidadãos aplicações e serviços que irão melhorar sua qualidade de vida. Assim são citados alguns exemplos de aplicações, como também pode ser visualizado na Figura 1. (a) *Smart Grid*; (b) Estacionamento Inteligente (*Smart Parking*); (c) Monitoramento de tráfego por vídeo (*Traffic Video Monitoring*).

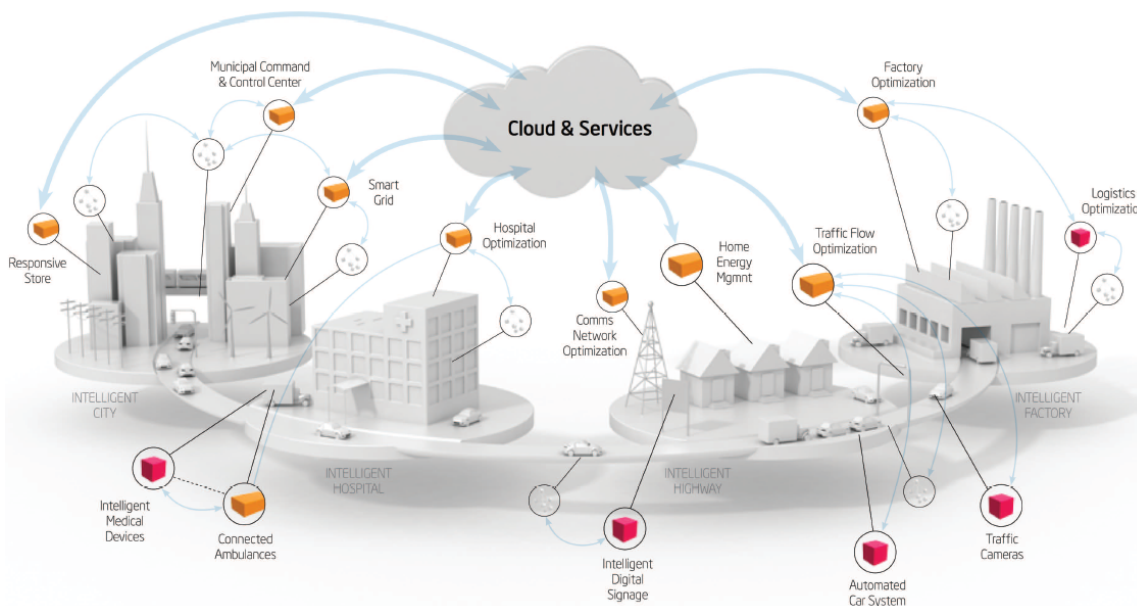


Figura 1: Framework de sistemas inteligentes de uma cidade. Intel [2012]

2.2. Topologias de Redes de Acesso

Rede de acesso é o termo que descreve a parte da rede de comunicação que proporciona a conectividade entre os usuários finais (nós terminais) e a unidade central da rede. Os usuários finais podem ser também os retransmissores de sinal para sub-redes. O termo Nova Geração de Redes (*NGN* do inglês *Next Generation Network*) faz referência a tendência de convergência de redes de comunicação fixas e móveis, não deixando de lado as tecnologias de acesso utilizadas atualmente. O fator chave para atingir este objetivo é o encapsulamento do tráfego no protocolo *IP* - do inglês *Internet Protocol*. Por outro lado, o conceito da *Internet* das coisas para cidades inteligentes é novo e não muito pesquisado, tem sido conduzido até agora, como necessitando de uma rede de comunicação dedicada para acomodar estas aplicações. A combinação dos fatos mencionados conduziu a pesquisa para soluções que proporcionem altas taxas de transmissão e alta disponibilidade para os usuários.

2.3. Tecnologias de Redes de Fibra Óptica

A fibra óptica é leve e flexível, feita de vidro (sílica) ou plástico, utilizada nas redes de telecomunicações para transportar sinais de luz com uma largura de banda maior que qualquer outra tecnologia com fios. Devido a baixa atenuação, os sinais são transmitidos através de longas distâncias[Maia, 2013]. A fibra óptica pode ser monomodo ou multimodo. As fibras multimodo são caracterizadas por um grande diâmetro do núcleo (50 a 62 microns). Devido a este fato, em



fibras multimodo existe o risco de maior dispersão o que limita as distâncias com este tipo de fibra [Agrawal, 2014]. A fibra monomodo tem um diâmetro menor do que a multimodo (5 a 10 microns), o que permite o uso de distâncias maiores. Vantagens do uso de fibra óptica: (a) Altas taxas de transferência de dados, da ordem de terabits/s em condições de laboratório; (b) Utilização de longas distâncias devido a baixa atenuação; (c) Nenhum campo eletromagnético externo, proporcionando segurança da rede.

2.3.1. Redes Ópticas Passivas

Com o crescimento do consumo de redes de telecomunicação com utilização de fibras ópticas, surgiu a arquitetura de Redes Ópticas Passivas (*PON*). Isto possibilitou que empresas de telecomunicação invistam menos recursos financeiros na rede de infraestrutura para atender os clientes nas redes de acesso [Segarra et al., 2012]. A arquitetura *PON* permite que uma única fibra seja dividida em mais fibras, servindo vários usuários finais. Isto é possível com um componente passivo chamado *splitter*, que é um acoplador de fibra óptica passiva que divide a "luz" de uma única fibra em dois ou mais canais de fibras. Isto faz com que uma conexão na central de telecomunicação seja capaz de atender vários clientes na última milha, tornando possível para empresas fornecer o uso de comunicação de fibra óptica para uma grande parte da população (usuários residenciais e/ou comerciais) com menos investimentos financeiros.

3. Problema Alvo e Metodologia Proposta

Nesta seção, é detalhado o problema foco deste trabalho sobre projeto de infraestrutura de redes utilizadas por empresas de telecomunicações, um desafio presente em diferentes áreas de negócio e empresas de serviços públicos, tais como distribuição de energia, gás e água. O problema é frequentemente o mesmo: otimizar a instalação de equipamentos em uma região geográfica com objetivo de reduzir custos. Este problema tem sido modelado e estudado na literatura como Problema de Planejamento de Redes (*Network Design Problem - NDP*). Assim para o problema de planejamento da rede será utilizado o modelo da Árvore Geradora Mínima Capacitada em Níveis - AGMCN; e alguns pontos precisam ser observados: (a) Quantidade de clientes a serem atendidos (nós de demanda) da rede; (b) Quantidade de níveis de rede; (c) Quantidade e localização dos equipamentos em cada nível (nós facilitadores); (d) O caminho entre os nós considerando a área geográfica.

3.1. Problema Alvo

Com o crescimento da demanda do tráfego impulsionado pela universalização dos serviços, torna-se cada vez maior a necessidade de implantação das redes de acesso de telecomunicações de alta velocidade e capacidade, principalmente no que tange a implantação dos conceitos de cidades inteligentes, onde sensores devem estar estrategicamente distribuídos para a coleta de informações a fim de abastecer com informações as aplicações disponíveis aos gestores e cidadãos. Em muitas cidades já existem redes de fibras ópticas, mas que ainda não conseguem ter a máxima cobertura para disponibilizar os serviços de uma cidade inteligente. Com o propósito de realizar o planejamento de projetos de redes de comunicação com o intuito de atender aos requisitos de uma cidade inteligente, na seção a seguir é apresentado o método proposto, ou seja, as estratégias que possibilitam a elaboração de projetos de redes de comunicação de acesso, através de métodos computacionais adequados.

3.2. Metodologia Proposta

Esta seção tem a finalidade de apresentar a modelagem matemática do problema, as estratégias adotadas na busca pela solução e a arquitetura proposta para o sistema computacional.

3.2.1. Modelagem Matemática do Problema da AGMCN Aplicada neste Trabalho

Esta seção apresenta a formulação matemática (parte da contribuição deste trabalho) que representa o problema de infraestrutura de redes em vários níveis. A representação possibilita a identificação dos diversos níveis da rede (Árvore Geradora Mínima Capacitada em Níveis - AGMCN) mantendo um caminho único entre o nó central (OLT) até os nós clientes, como pode

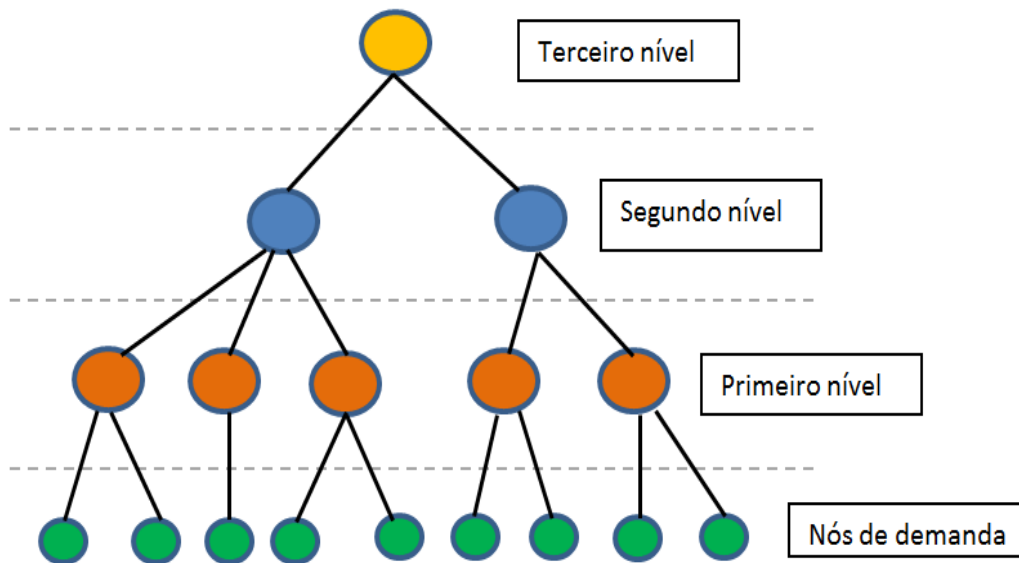


Figura 2: Exemplificação dos níveis de uma rede com 3 níveis.

ser visualizado na Figura 2, levando em consideração algumas premissas que impactam no custo do projeto.

O modelo de otimização é dado por:

Minimizar:

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n X_{ij} (C_c D_{ij}) + \sum_{l=1}^{V-1} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n Z_{lij} (C_l D_{ij}) + \sum_{l=1}^V \sum_{i=1}^n W_{li} E_l \quad (1)$$

Restrições:

$$\sum_{l=1}^{V-1} \sum_{j=1}^n Z_{lij} = 1, \forall i \quad (2)$$

$$\sum_{j=1}^n X_{ij} = 1, \forall i \quad (3)$$

$$\sum_{l=1}^V W_{li} \leq 1, \forall i \quad (4)$$

Onde:

- m : número de clientes;
- n : número de nós candidatos a receberem equipamento;
- X_{ij} : conexão entre o cliente i e o equipamento j de nível 1;
- V : número de níveis da rede;
- Z_{lij} : conexão entre os nós i e j no nível l ;
- C_c : custo da ligação do cliente ao nível 1;



- D_{ij} : distância entre os nós i e j no nível l ;
- C_l : custo da ligação de nível l ;
- W_{li} : equipamento instalado no nível l do nó i ;
- E_l : custo de um equipamento no nível l

A função objetivo representa o custo total da rede que consiste no custo de instalação (cabos e serviços de instalação) mais o custo dos equipamentos utilizados nos nós da rede. O custo dos cabos de fibra óptica, demais materiais e do serviço é obtido por uma função simples utilizando o comprimento dos cabos instalados. O valor monetário das variáveis associadas a custos estão armazenadas em matrizes auxiliares e o custo de instalação de um equipamento é considerado dez vezes maior que o do nível anterior (100, 1000, 10000, ...). Esta relação de valores é utilizada para manter uma compatibilidade com os valores aplicados na implantação de diferentes níveis da infraestrutura. A relação de valor utilizada para cada nível leva em consideração as diferenças de custos entre os equipamentos. Outro custo considerado na função é a distância do trajeto entre os equipamentos e entre equipamentos e clientes. Geralmente, o custo dessa distância é o custo monetário dos cabos utilizados mais o custo de instalação. Para os experimentos, é considerada 1 (uma) unidade monetária para o primeiro nível, 2 (duas) unidades monetárias para o segundo nível, 3 (três) unidades monetárias para o terceiro nível, e assim por diante.

A restrição 2 define a ligação entre nós para cada nível, onde essa ligação só pode ter um destino de um nível. Enquanto a restrição 3 mostra que cada cliente só pode estar conectado a um ponto do primeiro nível. E a restrição 4 identifica que cada ponto só pode ter um tipo de equipamento instalado.

4. Metodologia de Condução dos Experimentos

A solução do NDP é composta por duas etapas que, em conjunto, tem o objetivo de otimizar o desenho da rede através da minimização dos custos de ligação e instalação. Essas etapas são:

- Criação de uma matriz de adjacências a partir da base de dados do problema;
- Execução da rotina de otimização utilizando algoritmo genético.

A matriz de adjacências contém as distâncias mínimas entre os pontos da rede e é criada através da utilização do algoritmo de Floyd-Warshall [Floyd, 1962], pois apresenta excelente desempenho e possui uma implementação bastante simples. Assim, a matriz é criada rapidamente. O propósito da montagem da matriz de adjacências já no início da solução é de evitar a necessidade de executar rotinas de obtenção de caminho mínimo na rotina de avaliação do algoritmo genético, bem como armazenar os caminhos mínimos entre os pares de pontos.

O modelo utilizado para obter soluções para o NDP utiliza um algoritmo genético [Goldberg, 1989],[Greensmith et al., 2010], pois é uma metaheurística extensamente estudada e que traz bons resultados para problemas NP-Difíceis como o NDP [Kampstra et al., 2006]. A figura 3 apresenta uma visão geral de como o algoritmo genético funciona, tendo sua ideia principal baseada na evolução das espécies na natureza, onde os indivíduos mais aptos tem maiores chances de sobreviver e transmitir suas características genéticas para as novas gerações.

O algoritmo inicia com uma população gerada aleatoriamente e através do processo de mutação e cruzamento são gerados novos indivíduos. Um processo de seleção, onde os mais aptos têm mais chances de sobreviver, se encarrega de reduzir a população novamente para o início de uma nova geração, e reiniciando o processo a partir desta nova população. Durante o processamento das gerações os indivíduos são avaliados e aquele com melhor aptidão é armazenado como a melhor solução.

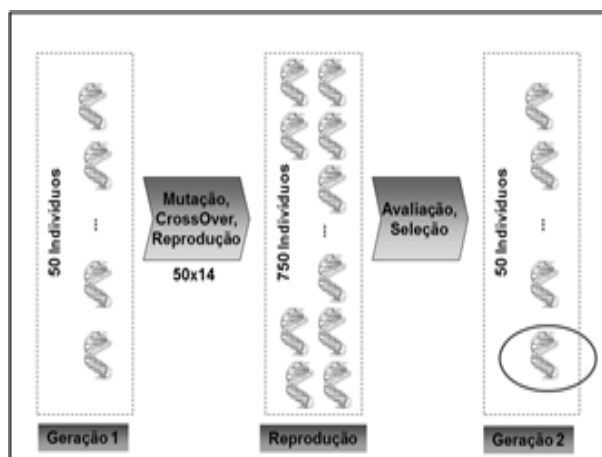


Figura 3: Visão geral do algoritmo genético proposto.

Representação dos indivíduos: O algoritmo genético utiliza um cromossomo para constituir um indivíduo, que representa uma solução viável para o problema. O tamanho do cromossomo é igual ao número de pontos da rede onde há possibilidade de instalar um equipamento. Nesse tamanho não estão incluídos os pontos de demanda, pois em nosso modelo não há necessidade de incluí-los no cromossomo. No cromossomo, cada parte (gene) representa um ponto da rede onde há a possibilidade de ser instalado um equipamento. Cada gene poderá assumir um valor de 0 ao limite de níveis, onde 0 significa que o ponto não será utilizado, 1 significa que será utilizado por um equipamento de nível 1, 2 por um de nível 2 e assim sucessivamente até o limite de níveis que se está trabalhando.

| Ponto da Rede | | | | | | | | | |
|---------------|---|---|---|---|---|---|---|---|----|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| 1 | 0 | 2 | 3 | 2 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 |

0 → Vazio
1 → Pontos de Acesso
2 → Nós Concentradores
3 → Nó Central

Figura 4: Exemplo de cromossomo com limite de níveis igual a 3.

Função objetivo: Para cada indivíduo obtido é necessário extrair o índice que representa sua qualidade ou aptidão. Isto é feito através da função objetivo, que neste trabalho é a soma dos custos de cada ligação e de cada instalação. Esses valores são obtidos após o processamento da rotina de avaliação dos indivíduos.

População e inicialização: O modelo foi implementado com uma população de 50 indivíduos, que são inicializados aleatoriamente. Na inicialização foi implementado o parâmetro P_v , que representa a probabilidade de um gene do cromossomo ser iniciado com valor zero (ponto da rede vazio). Assim, $P_v=1$ indica que a probabilidade de se ter pontos vazios é a mesma dos outros tipos, $P_v=2$ indica o dobro de probabilidade e assim por diante. A motivação da utilização deste parâmetro é muito comum em problemas NDP que a rede mais otimizada tenha mais pontos vazios do que com equipamentos. Assim, o algoritmo genético já parte de uma solução melhor, além do fato de que a execução das gerações se torna mais rápida, pois o tempo de processamento da função de avaliação é proporcional ao número de pontos com equipamentos. Em nossos experimentos



utilizamos $P_v=2$.

Reprodução e seleção: A cada nova geração são criados 700 novos indivíduos através da combinação de cada indivíduo com os 14 mais aptos da população. Assim, do total de 750 indivíduos, somente 50 são selecionados para a próxima geração. A criação dos 14 novos indivíduos (para cada um já existente) é feita utilizando-se do método de cruzamento parcial mapeado *PMX - Partial Mapped Crossover* [Goldberg e Lingle, 1985] e do método de mutação através de troca interna no cromossomo (operador *swap*). O método de cruzamento *PMX* requer um ajuste onde, após a execução do cruzamento, é feita uma verificação para garantir que todos os níveis estejam representados no cromossomo com pelo menos uma ocorrência. O percentual de cruzamento é de 90% e a taxa de mutação é variável, sendo determinada aleatoriamente entre 0.1% e 10% a cada 10 gerações. A seleção dos 50 indivíduos que sobrevivem para a geração seguinte é feita compondo-se o melhor indivíduo (seleção elitista) mais outros 49 selecionados através do método de roleta de seleção, onde a probabilidade de seleção é dada pelo inverso do índice gerado pela função objetivo.

Instâncias utilizadas: Após a definição do modelo e sua codificação, testamos o programa com duas instâncias distintas, uma com 3 e outra com 5 níveis para cada uma das três bases de dados a fim de obter os resultados da otimização.

Implementação: A implementação do modelo proposto divide-se basicamente em duas partes distintas:

- Rotina de controle da parte evolutiva: responsável pelo processamento das gerações, manutenção da população, cruzamentos entre indivíduos, mutações dos cromossomos, aplicação da roleta de seleção para selecionar a nova geração e verificação do critério de parada, que em nosso caso será o limite de 5.000 gerações.
- Rotina de avaliação dos indivíduos: responsável pela transformação do cromossomo em mapa contendo as ligações das demandas e dos nós de conexão até o nó central. Esta etapa é executada em três partes distintas:
 - Conexão das demandas aos nós de primeiro nível: cada demanda é conectada ao nó de primeiro nível mais próximo, dentre aqueles disponíveis segundo a indicação no cromossomo. A escolha do ponto de nível 1 mais próximo ocorre com o auxílio da matriz de adjacências gerada no início do processo de otimização.
 - Conexão dos nós intermediários aos nós do próximo nível: cada nó do nível n é conectado ao nó do nível $n+1$ mais próximo, dentre aqueles disponíveis segundo a indicação do cromossomo. A escolha do ponto de nível $n+1$ mais próximo ocorre com o auxílio da matriz de adjacências gerada no início do processo de otimização.
 - Soma dos custos de cada ligação e de cada instalação, gerando assim o valor da função objetivo.

| Base de Dados | Nós de demanda | Coordenadas (locais candidatos para instalação de facilidades) | Área (Km ²) |
|---------------|----------------|--|-------------------------|
| Base 1 | 50 | 390 | 2,1 |
| Base 2 | 105 | 583 | 2,5 |
| Base 3 | 405 | 1624 | 6,1 |

Tabela 1: Bases de dados georreferenciadas



5. Testes e resultados

O algoritmo genético capaz de trabalhar com o modelo proposto foi codificado em linguagem Pascal e cada instância de testes foi executada 10 vezes. Para a execução do programa foi utilizado um computador com sistema operacional Windows 8.1 e processador Intel Core i7-4500U 2.4GHz e 8GB de memória, onde somente um núcleo físico de processamento foi utilizado exclusivamente para a execução (sem processamento paralelo). Foram utilizadas três bases de dados conforme informações contidas na tabela 1, cujos resultados são comparados com o trabalho apresentado por Silva et al. [2013] e demonstrados a seguir.

Resultados da Instância 1: A tabela 2 apresenta os resultados obtidos pelo algoritmo genético proposto. Na tabela os resultados estão separados em linhas de cada nível. Cada coluna representa uma base de dados que contabilizam: (a) a quantidade de demandas a serem atendidas; (b) a quantidade de facilidades encontradas para atender as demandas em cada nível; e (c) o custo da solução em unidades monetárias. E na figura 5 é apresentado a mapa com o resultado da base 1 com 3 níveis.

Resultados da Instância 2: Apesar de ser comum as redes de telecomunicações terem três níveis de equipamentos, em algumas situações, como em PON, pode ser necessário planejar redes com mais níveis. Na tabela 3 são apresentados os resultados com 5 níveis. E na figura 6 é apresentado a mapa com o resultado da base 1 com 5 níveis.

| Algoritmo | Base de Dados | Base 1 | Base 2 | Base 3 |
|----------------------|--------------------------|--------------|--------------|--------------|
| | | Demandas | 50 | 105 |
| GA (Silva, 2012) | Nível 1 | 28 | 46 | 132 |
| | Nível 2 | 6 | 10 | 81 |
| | Nível 3 | 1 | 1 | 75 |
| | Tempo de Execução (seg.) | 5.589 | 17.385 | 213.287 |
| | Custo total | 52.250 | 73.526 | 963.382 |
| PSO (Silva, 2012) | Nível 1 | 14 | 23 | 67 |
| | Nível 2 | 4 | 4 | 15 |
| | Nível 3 | 1 | 1 | 3 |
| | Tempo de Execução (seg.) | 5.326 | 13.922 | 136.583 |
| | Custo total | 46.476 | 56.666 | 184.987 |
| GA (proposto) | Nível 1 | 7 | 12 | 87 |
| | Nível 2 | 2 | 2 | 9 |
| | Nível 3 | 1 | 1 | 1 |
| | Tempo de Execução (seg.) | 120 | 180 | 3.600 |
| | Custo total | 35.615 | 47.608 | 149.274 |
| | % Melhoria | 23,4% | 16,0% | 19,3% |

Tabela 2: Resultados instância 1



| Algoritmo | Base de Dados | Base 1 | Base 2 | Base 3 |
|--------------------------|--------------------------|-------------|-------------|--------------|
| | Demandas | 50 | 105 | 405 |
| GA (Silva, 2012) | Nível 1 | 24 | 46 | 126 |
| | Nível 2 | 6 | 11 | 87 |
| | Nível 3 | 1 | 1 | 75 |
| | Nível 4 | 1 | 1 | 68 |
| | Nível 5 | 1 | 1 | 68 |
| | Tempo de Execução (seg.) | 7.339 | 26.328 | 390.967 |
| | Custo total | 1.152.755 | 1.172.926 | 75.688.821 |
| | PSO (Silva, 2012) | Nível 1 | 20 | 23 |
| Nível 2 | | 6 | 6 | 16 |
| Nível 3 | | 1 | 1 | 3 |
| Nível 4 | | 1 | 1 | 2 |
| Nível 5 | | 1 | 1 | 2 |
| Tempo de Execução (seg.) | | 7.339 | 19.232 | 220.884 |
| Custo total | | 1.150.260 | 1.158.810 | 2.394.322 |
| GA (proposto) | | Nível 1 | 16 | 19 |
| | Nível 2 | 3 | 3 | 222 |
| | Nível 3 | 1 | 1 | 1 |
| | Nível 4 | 1 | 1 | 1 |
| | Nível 5 | 1 | 1 | 1 |
| | Tempo de Execução (seg.) | 442 | 1.200 | 8.000 |
| | Custo total | 1.138.735 | 1.150.620 | 1.915.742 |
| | % Melhoria | 1,0% | 0,7% | 20,0% |

Tabela 3: Resultados instância 2

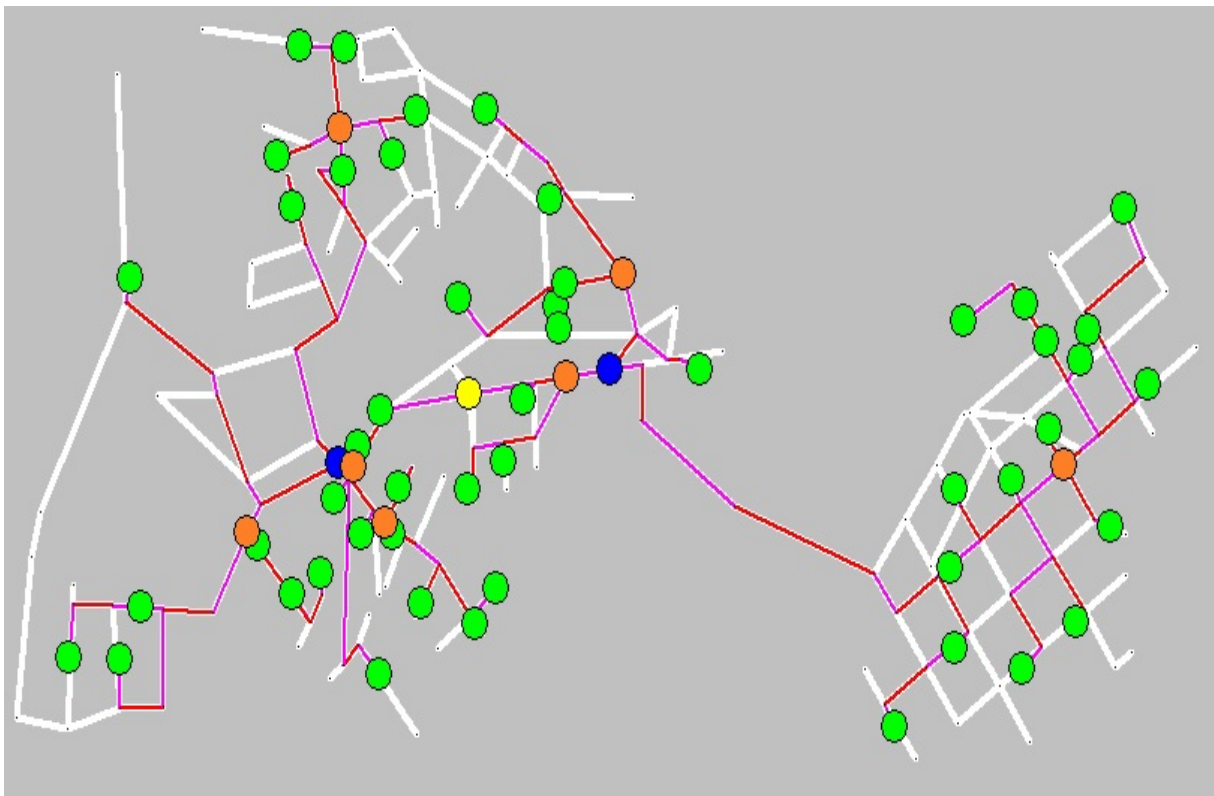


Figura 5: Mapa com o resultado da Base 1 com 3 níveis.

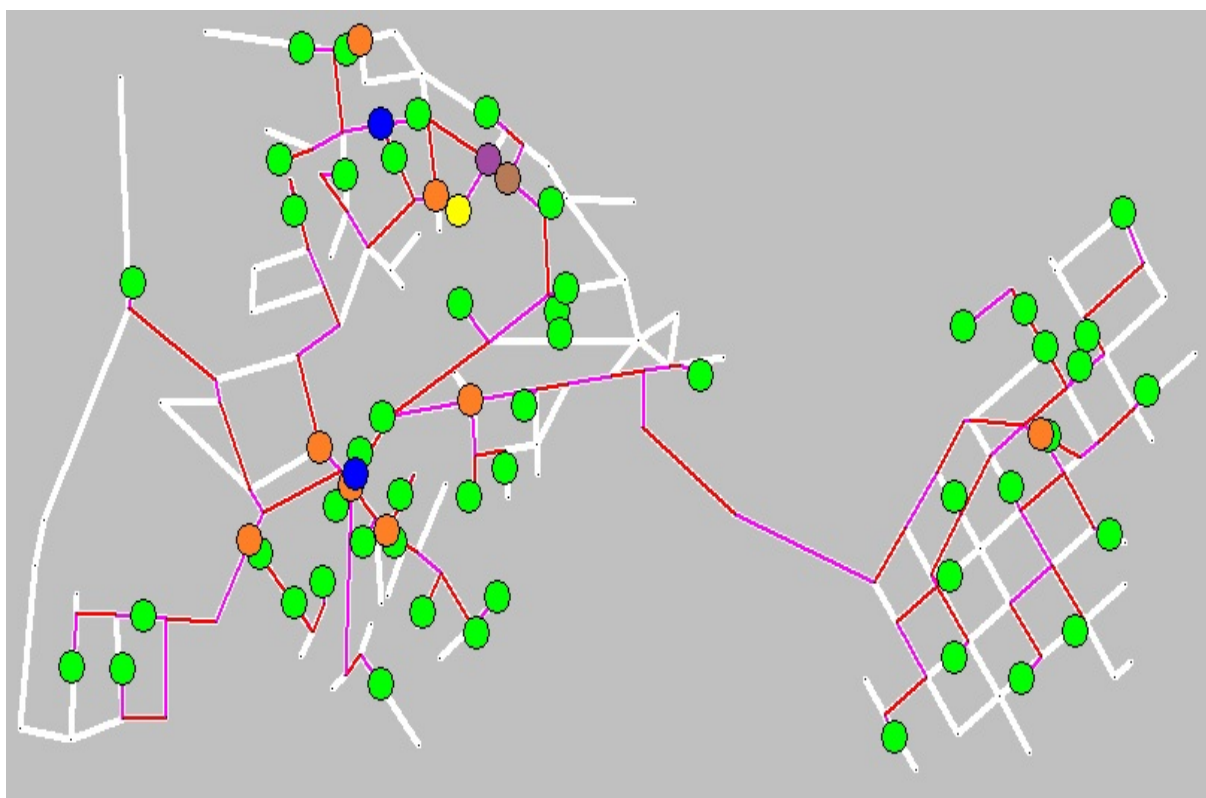


Figura 6: Mapa com o resultado da Base 1 com 5 níveis.

6. Conclusão e trabalhos futuros

As redes de telecomunicações tem se tornado muito importantes para a sociedade como um todo e principalmente para as cidades inteligentes. A disponibilização dos meios de comunicação prescinde do melhor planejamento da rede. Neste trabalho, o NDP foi modelado como um problema de otimização. Assim o resultado esperado deste trabalho foi atingido com o melhor planejamento da rede a custo mais acessível, levando em consideração a comparação com o trabalho de [Silva et al., 2013] apresentando melhores resultados devido a decisão de elaborar a matriz de adjacências contendo as distâncias mínimas entre os pontos de rede antes de iniciar a otimização com o algoritmo genético, pois os resultados obtidos demonstraram uma melhora de aproximadamente 20% para a instância com 3 níveis e de 20% para a base 3 na instância de 5 níveis.

Como trabalhos futuros mais restrições serão desenvolvidas e analisadas além das apresentadas neste trabalho, como: (i) o comprimento máximo de um cabo é de 2.000 metros; (ii) a atenuação normal de uma fibra óptica é de 0,25 dB/km, a atenuação para cada emenda por fusão é de 0,05 dB/emenda, e a atenuação de segurança é de 5,2 dB; (iii) o valor máximo de atenuação tolerado é de 28 dB; (iv) o valor máximo de cisões é 32. Essas restrições técnicas são de vital importância pois, caso o nível de atenuação e a distância máxima entre os nós clientes e o ponto de central da rede não for respeitada a mesma não funcionará em perfeitas condições. E também o desenvolvimento para encontrar com eficácia a melhor configuração da rede híbrida (óptica - sem fio) de uma cidade inteligente de forma simplificada, a fim de proporcionar: (a) Atender a todas as demandas de comunicação de dados necessários para operacionalização de uma cidade inteligente; (b) O refinamento e expansão da rede híbrida, no que tange a questão de redundância; (c) A análise comparativa entre CAPEX x OPEX visando a sustentabilidade da rede.

Referências

Agrawal, G. P. (2014). *Sistemas de comunicação por fibra óptica*. Elsevier - Campus, São Paulo.



Chiu, P. L. e Lin, F. Y. S. (2004). A simulated annealing algorithm to support the sensor placement for target location. p. 867–870.

Floyd, R. W. (1962). Algorithm 97: Shortest path. *Communications of the ACM* 5, 6.

Goldberg, D. (1989). *Genetic algorithms in search, optimization and machine learning*. Addison-Wesley.

Goldberg, D. E. e Lingle, R. (1985). Alleles, loci and traveling salesman problem. p. 154–159.

Greensmith, J., Withbrooke, A., e Aickelin, U. (2010). *Handbook of metaheuristics*. Springer.

Intel (2012). Intel. Disponível em: <<https://embedded.communities.intel.com/community/en/applications/blog/2012/09/reporter-intel-intelligent-systems-framework-simplifies-internet-of-things>>. Acesso em: 10 novembro 2016.

Kampstra, P., van der Mei, R. D., e Eiben, A. E. (2006). Evolutionary computing in telecommunication network design: A survey.

Lee, J. H., Hancock, M. G., e Hu, M. C. (2013). Towards an effective framework for building smart cities: Lessons from seoul and san francisco. *Technological Forecasting and Social Change*, 89: 80–99.

Maia, L. P. (2013). *Arquitetura de redes de computadores*. LTC, Rio de Janeiro.

Monteiro, M. S. R., Fontes, D. B. M. M., e Fontes, F. a. C. C. (2015). The hop-constrained minimum cost flow spanning tree problem with nonlinear costs: an ant colony optimization approach. *Optimization Letters*, 9(3):451–464.

Petrolo, R., Loscrí, V., e Mitton, N. (2014). Towards a smart city based on cloud of things. *Proceedings of the 2014 ACM international workshop on Wireless and mobile technologies for smart cities - WiMobCity '14*, p. 61–66.

Piro, G., Cianci, I., Grieco, L. A., Boggia, G., e Camarda, P. (2014). Information centric services in Smart Cities. *Journal of Systems and Software*, 88(1):169–188.

Segarra, J., Sales, V., e Prat, J. (2012). Planning and designing FTTH networks: Elements, tools and practical issues. *International Conference on Transparent Optical Networks*, p. 1–6.

Silva, H. A. D., De Souza Britto, A., Oliveira, L. E. S. D., e Koerich, A. L. (2013). Network infrastructure design with a multilevel algorithm. *Expert Systems with Applications*, 40(9):3471–3480. ISSN 09574174. URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.eswa.2012.12.055>.

Sukode, S., Gite, P. S., e Agrawal, H. (2015). CONTEXT AWARE FRAMEWORK IN IOT : A SURVEY. 4(1):1–9.

Varvarigos, E. a. e Christodouloupoulos, K. (2014). Algorithmic aspects in planning fixed and flexible optical networks with emphasis on linear optimization and heuristic techniques. *Journal of Lightwave Technology*, 32(4):681–693.

Watcharasitthiwat, K. e Wardkein, P. (2009). Reliability optimization of topology communication network design using an improved ant colony optimization. *Computers and Electrical Engineering*, 35(5):730–747.