



Programa Interdisciplinar de Pós-Graduação em  
**Computação Aplicada**  
Mestrado Acadêmico

Márcio Joel Barth

OTIMIZAÇÃO MULTI-NÍVEL PARA PROJETO DE REDES  
HÍBRIDAS (ÓPTICAS E SEM FIO) PARA IMPLEMENTAÇÃO  
DE CIDADES INTELIGENTES

São Leopoldo, 2016

UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS — UNISINOS  
UNIDADE ACADÊMICA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM COMPUTAÇÃO APLICADA  
NÍVEL MESTRADO

MÁRCIO JOEL BARTH

OTIMIZAÇÃO MULTI-NÍVEL PARA PROJETO DE REDES HÍBRIDAS (ÓPTICAS E SEM  
FIO) PARA IMPLEMENTAÇÃO DE CIDADES INTELIGENTES

SÃO LEOPOLDO  
2016



Márcio Joel Barth

OTIMIZAÇÃO MULTI-NÍVEL PARA PROJETO DE REDES HÍBRIDAS (ÓPTICAS E SEM FIO) PARA IMPLEMENTAÇÃO DE CIDADES INTELIGENTES

Dissertação apresentada como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Computação Aplicada da Universidade do Vale do Rio dos Sinos — UNISINOS

Orientador:  
Prof. Dr. José Vicente Canto dos Santos

São Leopoldo  
2016

B284o Barth, Márcio Joel  
Otimização multi-nível para projeto de redes híbridas (ópticas e sem fio) para implementação de cidades inteligentes / Márcio Joel Barth -- 2016.  
96 f. : il. color. ; 30cm.  
Dissertação (mestrado em Computação Aplicada) -- Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Programa de Pós-Graduação em Computação Aplicada, São Leopoldo, RS, 2016.  
Orientador: Prof. Dr. José Vicente Canto dos Santos.

1. Ciência da computação. 2. Planejamento de redes. 3. Algoritmo multi-nível. 4. Cidade inteligente. I. Título. II. Santos, José Vicente Canto dos.

CDU 004

MÁRCIO JOEL BARTH

OTIMIZAÇÃO MULTI-NÍVEL PARA PROJETO DE REDES HÍBRIDAS (ÓPTICAS E SEM FIO) PARA  
IMPLEMENTAÇÃO DE CIDADES INTELIGENTES

Dissertação apresentada à Universidade do Vale do Rio dos Sinos – Unisinos, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Computação Aplicada.

Aprovado em 25/11/2016.

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. Sérgio Luís Haffner – UFRGS

---

Prof. Dr. Leonardo Dagnino Chiwiacowsky – UCS

---

Prof. Dr. Luiz Paulo Luna de Oliveira – UNISINOS

Prof. Dr. José Vicente Canto dos Santos  
Orientador

Visto e permitida a impressão  
São Leopoldo,

Prof. Dr. Sandro José Rigo  
Coordenador PPG em Computação Aplicada



A todos.

*Talvez não tenha conseguido fazer o melhor, mas lutei para que o melhor fosse feito. Não sou o que deveria ser, mas Graças a Deus, não sou o que era antes.*

— MARTIN LUTHER KING



## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a DEUS, pela força e capacidade a mim conferidas para desenvolver este trabalho.

Agradeço a minha família em especial minha filha Natália, que compreenderem minha ausência em vários momentos e me apoiaram incondicionalmente para realização deste trabalho.

Agradeço ao meu orientador e agora amigo Prof. Dr. José Vicente Canto dos Santos pela motivação, orientações e ensinamentos para tornar este dia possível.

Agradeço todos que de uma forma ou outra contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho, entre eles, professores, colegas de mestrado, colegas de trabalho, e, em especial, ao meu colega e amigo Leandro Mengue pela parceria nos trabalhos das disciplinas, submissão de artigo e contribuição neste trabalho.

Agradeço em especial à PROCERGS - Companhia de Processamento de Dados do Estado do Rio Grande do Sul por possibilitar a minha participação no programa Bolsas de Estudos de Pós-Graduação.



## RESUMO

Estudos sobre infraestrutura de redes têm sido realizados e aplicados em várias indústrias de serviços, tais como telecomunicações, distribuição de energia, água e mais recentemente para atendimento das necessidades de infraestrutura de cidades inteligentes que requerem soluções de infraestrutura híbridas. Entretanto, o planejamento de infraestrutura de redes em vários níveis e também com máxima cobertura, 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, ou seja, no nível 1 são avaliadas as necessidades que atendem diretamente aos clientes, já o nível 2 atenderá as necessidades do nível 1, e que também sejam observados os níveis adjacentes. O resultado que um projetista obtém ao realizar manualmente o planejamento torna-se superficial, devido a inviabilidade de analisar todos os cenários que podem ser obtidos com as informações de quantidades e de distribuição dos equipamentos na região do projeto. Ainda mais complexo é alterar um nível já projetado, visto que é necessário rever a quantidade, localização e caminho entre os equipamentos, refazendo os cálculos do nível alterado, e, conseqüentemente, o nível anterior e todos os níveis subsequentes. Esta pesquisa apresenta um algoritmo baseado na metaheurística de colônia de formigas, capaz de procurar por uma solução para o planejamento de infraestrutura de redes híbridas multiníveis capacitadas, resolvendo o problema de recobrimento e planejamento de redes de forma conjunta e obtendo resultados melhores na ordem de 20% no custo da solução quando comparado com outra solução que utiliza algoritmo genético.

**Palavras-chave:** Planejamento de redes. Algoritmo multinível capacitado. Cidades inteligentes.



## ABSTRACT

Studies on network infrastructure have been used and applied in various service industries, such as telecommunications, power distribution, water, and more recently to meet the smart city infrastructure needs, that require hybrid infrastructure solutions. However, planning multilevel network infrastructures and also with maximum coverage is an open problem, since the literature generally presents solutions in which only one level is processed and problems solved individually. The distribution plan and equipment connection at various levels of a network infrastructure is a arduous task, it is necessary to evaluate the quantity and better geographical distribution of equipment at each level of the network, ie at level 1 are evaluated needs to meet directly to customers, since the level 2 from level 1 will meet the needs, and the adjacent levels are also observed. The result that a designer gets to manually carry out the planning becomes shallow due to impossibility of analyzing all scenarios that can be obtained with the amounts and distribution of information equipment in the project region. Even more complex is change a level already designed, since it is necessary to review the amount, location and path between devices, redoing the calculations of the modified level, and hence the previous level and all subsequent levels. This research presents an algorithm based on ant colony metaheuristics, capable of searching for a solution to the infrastructure planning of hybrid multilevel networks, solving the network planning and coverage problem together and obtaining better results in the order of 20% on the cost of the solution when compared to another solution using genetic algorithm.

**Keywords:** Network planning. Multilevel capacitated algorithm. Smart cities.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1:	<i>Framework</i> de sistemas inteligentes de uma cidade . . . . .	28
Figura 2:	<i>Framework Smart Grid - NIST</i> . . . . .	29
Figura 3:	<i>Framework Smart Parking</i> . . . . .	30
Figura 4:	Arquitetura de rede MARIN . . . . .	31
Figura 5:	Arquitetura <i>GROWNet</i> . . . . .	32
Figura 6:	Arquitetura <i>FiWi</i> . . . . .	33
Figura 7:	Arquitetura Projeto <i>Futon</i> . . . . .	34
Figura 8:	Arquitetura <i>WOBAN</i> . . . . .	35
Figura 9:	Esquema visual do <i>splitter</i> . . . . .	36
Figura 10:	Exemplo de rede óptica passiva . . . . .	37
Figura 11:	Modos de estrutura de redes <i>Wi-Fi</i> . . . . .	39
Figura 12:	Arquitetura da rede <i>WMN</i> . . . . .	41
Figura 13:	Arquitetura da rede de acesso híbrida óptica/sem fio . . . . .	42
Figura 14:	Exemplo de um grafo . . . . .	43
Figura 15:	Uma rede de comunicações e suas ligações . . . . .	45
Figura 16:	Exemplo da evolução do nível de feromônio em um caminho simples. . . . .	50
Figura 17:	Exemplo de construção de uma solução por uma formiga no algoritmo ACO . . . . .	50
Figura 18:	Algoritmo ACO . . . . .	52
Figura 19:	Exemplificação dos níveis de uma rede com três níveis. . . . .	60
Figura 20:	Arquitetura proposta da ferramenta computacional . . . . .	63
Figura 21:	Fluxograma do algoritmo ACO para o problema do recobrimento . . . . .	65
Figura 22:	Fluxograma do algoritmo ACO para o problema da árvore geradora mínima . . . . .	66
Figura 23:	Representação gráfica dos estados de um autômato . . . . .	67
Figura 24:	Autômato representando a aplicação do sistema computacional . . . . .	68
Figura 25:	Autômato representando a Fase 1 - Recobrimento . . . . .	69
Figura 26:	Autômato representando a busca de soluções da fase do recobrimento . . . . .	71
Figura 27:	Autômato representando a aplicação de busca local da fase do recobrimento . . . . .	72
Figura 28:	Autômato representando a Fase 2 - AGMCN . . . . .	73
Figura 29:	Autômato representando a aplicação de busca solução da Fase 2 - AGMCN . . . . .	75
Figura 30:	Autômato representando a aplicação de busca local da Fase 2 - AGMCN . . . . .	76
Figura 31:	Resultados dos Testes para diferentes valores dos parâmetros do ACO . . . . .	80
Figura 32:	Resultado do projeto da rede para a Base 1 . . . . .	81
Figura 33:	Rede projetada por um projetista de acordo com a Base 4 . . . . .	84
Figura 34:	Rede gerada pelo sistema computacional de acordo com a Base 4 . . . . .	84
Figura 35:	Criação do reticulado para resolução do problema do recobrimento . . . . .	85
Figura 36:	Resultado da Fase 1 - recobrimento com a Base 1 . . . . .	86
Figura 37:	Resultado da Fase 1 - recobrimento com a Base 4 . . . . .	86
Figura 38:	Resultado Final - Fase 1 e 2 - com a Base 1 . . . . .	88
Figura 39:	Resultado Final - Fase 1 e 2 - com a Base 4 . . . . .	89



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1:	Comparativo características <i>GEPON</i> x <i>GPON</i> . . . . .	38
Tabela 2:	Semelhanças e diferenças entre as formigas reais e o algoritmo ACO . . . . .	51
Tabela 3:	Comparativo trabalhos relacionados . . . . .	56
Tabela 4:	Bases de dados georreferenciadas . . . . .	78
Tabela 5:	Comparação dos resultados com diferentes métodos para solução do problema de infraestrutura de rede . . . . .	81
Tabela 6:	Resultado dos custos da rede da Base 4 - Sistema computacional x Projetista	82
Tabela 7:	Resultado dos custos da Rede Híbrida das Bases 1 e 4 . . . . .	87



## LISTA DE SIGLAS

ACO	Ant Colony Optimization
AG	Algoritmo Genético
AGMCN	Árvore Geradora Mínima Capacitada em Níveis
AP	Access Point
AS	Ant System
ATM	Asynchronous Transfer Mode
CAPEX	Capital Expenditure
EFM	Ethernet in the First Mile
EPON	Ethernet Passive Optical Network
ERB	Estação Rádio Base
FiWi	Fibre-Wireless Access Network
GEPON	Gigabit Ethernet Passive Optical Network
GPON	Gigabit Passive Optical Network
GRASP	Greedy Randomized Adaptive Search Procedure
GROWNet	Grid Reconfigurable Optical and Wireless Network
ICT	Information and Communication Technology
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IoS	Internet of Services
IoT	Internet of Things
IP	Internet Protocol
ITU-T	International Telecommunication Union
MARIN	Metro Access Ring Integrated Network
MCMST	Multilevel Capacitated Minimum Spanning Tree
NDP	Network Design Problem
NGN	Next Generation Network
NIST	National Institute of Standards and Technology
OECD	Organisation for Economic Co-operation and Development
ODN	Optical Distribution Network
OLT	Optical Line Terminal
ONT	Optical Network Terminal
ONU	Optical Network Unit
OPEX	Operational Expenditure
P2MP	Point to Multi Point

PA	Ponto de Assinante
PAGM	Problema da Árvore Geradora Mínima
PAGMC	Problema da Árvore Geradora Mínima Capacitada
PAGMCN	Problema da Árvore Geradora Mínima Capacitada em Níveis
PARFO	Ponto de Acesso da Rede de Fibra Óptica
PARFORSF	Ponto de Acesso da Rede de Fibra Óptica e Rede Sem Fio
PARSF	Ponto de Acesso da Rede Sem Fio
PLI	Programação Linear Inteira
PON	Passive Optical Network
PSO	Particle Swarm Optimization
RAU	Radio Access Unit
RoF	Radio over Fiber
TDM	Time Division Multiplexed
TDM PON	Time Division Multiplexed Passive Optical Network
TIC	Tecnologia da Informação e Comunicação
TSP	Travelling Salesman Problem
UC	Unidade Central
WAN	Wide Area Network
WDM	Wavelength Division Multiplexed
WEU	Wireless End User
WiMAX	Worldwide Interoperability for Microwave Access
WLAN	Wireless Local Area Network
WMAN	Wireless Metropolitan Area Network
WMN	Wireless Mesh Network
WOBAN	Wireless-Optical Broadband Access Network
WSN	Wireless Sensor Network

## LISTA DE SÍMBOLOS

$A$	Arestas de um grafo
$a_{ij}$	Nós e as relações entre as arestas
$\mathbf{c}$	Vetor custo
$c_i$	Elemento do vetor custo
$c_{ij}^l$	Custo de uma facilidade $l$ instalada entre os nós $i$ e $j$
$C_c$	Custo do material e serviços de instalação por metro
$C_{fs}$	Custo por serviço de fusão
$C_{Sts}$	Custo total dos <i>splitters</i> utilizados
$\mathbf{D}$	Matriz densidade
$d_{ij}$	Nós e as relações entre as arestas
$D_{ij}$	Distância entre o cliente e o <i>splitter</i> de nível secundário
$D_{jk}$	Distância entre o <i>splitter</i> de nível secundário e o <i>splitter</i> de nível primário
$D_{kl}$	Distância entre o <i>splitter</i> de nível primário e a OLT (ponto central da rede)
$DFO_{ij}$	Distância entre pontos de acesso PARFORSF
$DG$	Distância euclidiana máxima aceitável entre pontos de acesso PARFORSF
$DR$	Distância euclidiana máxima aceitável entre um roteador (PARSF) e o ponto de acesso PARFORSF
$DSF_{ki}$	Distância entre um roteador (PARSF) e um ponto de acesso PARFORSF
$f_{ij}^k$	Indica o fluxo do produto $k$ que passa pelo arco $(i, j)$
$g_{ij}$	Indica se a facilidade é instalada sobre o arco $(i, j)$
$G$	Grafo
$m$	Número de clientes
$M_k$	Atendimento a roteador (PARSF) $k$
$n$	Número de regiões do problema
$N^{k_i}$	Conjunto de vértices disponível para a formiga $k$ no vértice $i$
$P_{ij}^k$	Probabilidade que a formiga $k$ tem de ir do vértice $i$ para o vértice $j$
$SA_{ta}$	Custo de atenuação dos <i>splitters</i>
$sp$	Número de <i>splitters</i> primários
$ss$	Número de <i>splitters</i> secundários
$T$	Operador de transposição do vetor
$\mathbf{u}$	Vetor de restrições
$u_i$	Componente do vetor de restrições
$V$	Vértices de um grafo

$\mathbf{x}$	Vetor existência
$x_i$	Elemento inteiro e binário do vetor existência
$X_{ij}$	Conexão entre o cliente $i$ e o <i>splitter</i> secundário
$y_{ij}^l$	Indica se a facilidade do tipo $l$ foi instalada sobre o arco $(i, j)$
$Y_{jk}$	Conexão entre o <i>splitter</i> de nível secundário e o <i>splitter</i> de nível primário
$z$	Resultado da função objetivo
$Z_{kl}$	Conexão entre o <i>splitter</i> de nível primário e a OLT (ponto central da rede)
$Z_L$	Facilidades com capacidades
$\tau_{ij}$	Quantidade de feromônio entre os vértices $i$ e $j$
$\eta_{ij}$	Informação heurística entre os vértices $i$ e $j$
$\alpha$	Taxa de feromônio (importância) na escolha do vértice
$\beta$	Taxa da informação heurística (importância) na escolha do vértice
$\rho$	Taxa de atualização do feromônio
$\Delta\tau_{ij}$	Quantidade de feromônio que será depositado na aresta entre os vértices $i$ e $j$

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>23</b>
1.1	Motivação	23
1.2	Definição do Problema e Questão de Pesquisa	24
1.3	Objetivos	25
1.4	Organização do Trabalho	25
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>27</b>
2.1	Cidades Inteligentes	27
2.1.1	Exemplos de necessidades de conectividade nas cidades inteligentes	27
2.2	Topologias de Redes de Acesso	30
2.2.1	<i>Metro Access Ring Integrated Network (MARIN) architecture</i>	31
2.2.2	<i>Grid Reconfigurable Optical and Wireless Network (GROWNet)</i>	32
2.2.3	<i>Fiber-Wireless Access Network (FiWi)</i>	33
2.2.4	<i>FUTON</i>	33
2.2.5	<i>Wireless-Optical Broadband Access Network (WOBAN)</i>	34
2.3	Tecnologias de Redes de Fibra Óptica	34
2.3.1	Redes Ópticas Passivas	36
2.4	Tecnologias de Redes sem fio	38
2.4.1	<i>Wireless Local Area Network - WLAN</i>	38
2.4.2	<i>Wireless Metropolitan Area Network - WMAN</i>	39
2.4.3	<i>Wireless Mesh Network - WMN</i>	40
2.5	Redes híbridas de acesso ópticas e sem fio	40
2.6	Representação gráfica e numérica de redes de telecomunicações	43
2.6.1	Teoria dos Grafos	43
2.6.2	Representação de um Grafo por Matriz de Adjacências	44
2.7	O Problema do Recobrimento	45
2.8	O Problema da Árvore Geradora Mínima	47
2.8.1	Problema da Árvore Geradora Mínima Capacitada em Níveis	47
2.9	Otimização por Colônia de Formigas	49
<b>3</b>	<b>TRABALHOS RELACIONADOS</b>	<b>53</b>
3.1	Localização de Facilidades (Redes sem fio) e Máxima Cobertura	53
3.2	Recomposição de redes	54
3.3	Problema de planejamento de rede	54
3.4	Árvore Geradora Mínima	55
3.5	Considerações Finais do Capítulo	56
<b>4</b>	<b>PROBLEMA ALVO E METODOLOGIA PROPOSTA</b>	<b>57</b>
4.1	Problema Alvo	57
4.2	Metodologia Proposta	58
4.2.1	Modelagem Matemática do Problema do Recobrimento Aplicada neste Trabalho	58
4.2.2	Modelagem Matemática do PAGMCN Aplicada neste Trabalho	59
4.2.3	Metodologia de Condução dos Experimentos	62
4.2.4	Detalhamento do Sistema Computacional	67

<b>5</b>	<b>SIMULAÇÕES E RESULTADOS</b>	<b>77</b>
5.1	Bases de Dados para Testes	78
5.2	Seleção do algoritmo para definição de caminhos mínimos	78
5.3	Testes para o problema de infraestrutura de rede	79
5.4	Testes para o problema de infraestrutura de rede com a inclusão das restrições de atenuação e custos da rede GPON	82
5.5	Testes para o problema do recobrimento e infraestrutura de rede em conjunto	85
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS</b>	<b>91</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>93</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A globalização, a urbanização e a industrialização têm sido reconhecidas como três grandes propulsores que conduziram a civilização humana rumo ao século 21. De acordo com a OECD (2012), 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 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 de "coisas" para armazenar todas as informações geradas.

Assim, as redes de comunicação de dados têm 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; LOSCRÍ; MITTON, 2014), (PIRO et al., 2014), (SUKODE; GITE; AGRAWAL, 2015), é necessário um planejamento maior para poder disponibilizar o acesso a redes de comunicação da melhor forma e a um custo apropriado.

Na literatura, já existem trabalhos (CHIU; LIN, 2004), (WATCHARASITTHIWAT; WARDKEIN, 2009), (VARVARIGOS; CHRISTODOULOPOULOS, 2014), (MONTEIRO; FONTES; FONTES, 2015) a respeito da aplicação de métodos para a elaboração de projetos de redes de forma isolada, porém o intuito deste trabalho é o de projetá-las 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 custo para instalação da rede.

### 1.1 Motivação

Apesar do fato de que não existe uma definição definitiva do conceito de cidade inteligente, aplicações experimentais (FURUKAWA, 2015), (TELECO, 2015) são realizadas nesta direção. Tais aplicações têm como alvo atingir um grau de sustentabilidade em um ambiente cada vez

mais urbanizado, bem como a prestação de serviços para o bem-estar dos cidadãos.

As tecnologias da informação e comunicação (TIC) já estão prestando um papel fundamental para o desenvolvimento de sociedades e economias modernas, na função de seu sistema central (LEE; HANCOCK; HU, 2013). Em um ambiente de *Smart City*, a infraestrutura de TIC adere a esse papel, e ao mesmo tempo deve ser capaz de acomodar o tráfego das redes heterogêneas subjacentes adicionais, como definidos pela internet das coisas (*IoT* do inglês *Internet of Things*) e internet de serviços (*IoS* do inglês *Internet of Services*) (PETROLO; LOSCRÍ; MITTON, 2014). Por isso, muitos desafios são introduzidos para o planejamento do futuro das redes metropolitanas de acesso, que devem lidar com o tráfego heterogêneo disseminado por todos os tipos de sensores e atuadores implantados, a fim de transformar o ambiente em uma cidade inteligente.

Enquanto não há uma padronização final da infraestrutura de rede de comunicações para cidades inteligentes, muitas empresas fornecem implementações fragmentadas (FURUKAWA, 2015), (INTEL, 2012), (TELECO, 2015) que levam os cidadãos a um conceito limitado. A falta de um projeto concreto de infraestrutura para esta finalidade surge como uma questão importante, estabelecendo assim, inúmeros limites para as aplicações e para a qualidade do serviço que pode ser entregue. Considerando-se como a TIC é crítica para as cidades inteligentes, conclui-se que um projeto de uma rede dedicada é imperativo. Portanto, durante esta dissertação, os desafios de planejamento de rede e dimensionamento para estes cenários serão abordados.

## 1.2 Definição do Problema e Questão de Pesquisa

Uma infraestrutura de rede de alto desempenho e dedicada é crucial para a implementação do conceito de cidade inteligente. Este trabalho será focado no planejamento e concepção da rede metropolitana de acesso, que irá fornecer a conectividade desejada para as aplicações da cidade inteligente. O aspecto à prova de futuro é um dos requisitos fundamentais para esta rede, uma vez que irá hospedar vários aplicativos e serviços existentes e novos. A questão genérica que trata este projeto pode ser resumida com a seguinte pergunta:

**Como projetar a rede de acesso metropolitana que satisfaça os requisitos de aplicação para a cidade inteligente?**

A contribuição deste projeto pode ser descrita da seguinte forma:

- Investigar o estado da arte de redes metropolitanas e redes de acesso heterogêneas e diferentes tecnologias usadas em tais redes;
- Propor uma arquitetura de rede de acesso metropolitana que atenda aos requisitos de cidade inteligente;

- Planejamento e dimensionamento dessa arquitetura em um cenário real.

A implementação do conceito de cidade inteligente terá uma infraestrutura de rede adequada, capaz de suportar tecnologias e aplicações heterogêneas.

### 1.3 Objetivos

O objetivo deste trabalho é o de apresentar um método computacional para o projeto de redes de acesso híbrido (fibras ópticas e sem fio), que na literatura tem sido modelado e estudado como Problema de Planejamento de Redes (*Network Design Problem - NDP*). O problema é frequentemente o mesmo: otimizar a instalação de equipamentos em uma região geográfica, com objetivo de reduzir custos. Neste trabalho também foi utilizada a técnica conhecida como árvore geradora mínima capacitada multinível (*MCMST* do inglês *Multilevel Capacitated Minimum Spanning Tree*). Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Permitir a avaliação da eficácia do projeto de rede elaborado pelo método computacional versus projeto elaborado por um projetista;
- Calcular a capacidade da rede de comunicação;
- Elaborar um modelo de rede que seja capaz de atender os diversos tipos de dispositivos que se conectarão na rede de comunicação;
- Possibilitar a avaliação de fatores econômicos tais como *CAPEX - OPEX*, investimento versus operação, envolvidos no processo de implantação de cidades inteligentes.

### 1.4 Organização do Trabalho

Esta dissertação está dividida em seis capítulos. O capítulo 2 discute a fundamentação teórica e topologias que servem como base para o desenvolvimento deste trabalho. No capítulo 3, são apresentados os trabalhos relacionados ao problema de localização de facilidades, máxima cobertura, problema de planejamento e recomposição de redes e também sobre árvore geradora mínima. O problema alvo e a metodologia proposta são apresentados no capítulo 4. No capítulo 5, são descritos os resultados e simulações realizadas. Por fim, o capítulo 6 contém as conclusões e proposições para trabalhos futuros.



## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo traz uma breve introdução às teorias necessárias para a compreensão do trabalho.

### 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 à educação, saúde, mobilidade urbana e saneamento, entre outros, podem ser listados como prioridades dos gestores públicos e foco das empresas envolvidas na formatação e gestão de soluções para os ambientes urbanos.

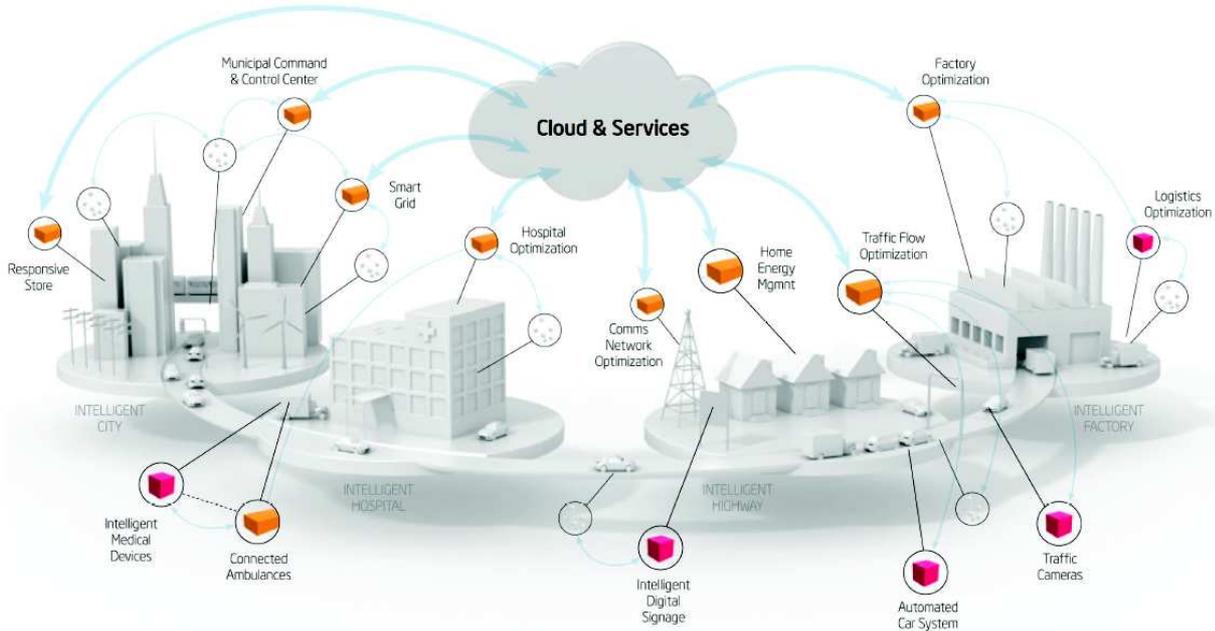
Lee, Hancock e Hu (2013) sugerem componentes para uma proposta de modelo para análise de cidades inteligentes que são listados a seguir: governo aberto, inovação de serviços, formação de parcerias, proatividade urbana, governança da cidade inteligente e integração da infraestrutura da cidade inteligente. Este último tópico vai ao encontro do objetivo desta pesquisa, pois trata especificamente da 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 necessidades de conectividade nas cidades inteligentes

A ideia de um projeto de cidade inteligente, do ponto de vista da TIC, é oferecer aos cidadãos aplicações e serviços que irão melhorar sua qualidade de vida. Assim, serão citados alguns exemplos de aplicações conforme a Figura 1, exemplificando suas necessidades de conectividade com a rede de comunicação.

##### *Smart Grid*

As aplicações de *Smart Grid* (redes elétricas inteligentes) pretendem melhorar a relação consumo x produção de energia elétrica. Atualmente, a energia produzida e oferecida em determinados momentos é maior dos que as necessidades reais devido à falta de informação imediata sobre a energia produzida e a real necessidade de consumo. Isso leva a um grande desperdício de recursos, a fim de evitar interrupções de fornecimento de energia elétrica. Neste sentido, novas arquiteturas foram propostas para que as redes elétricas inteligentes (*Smart Grid*) possam suportar não somente o fluxo de energia, mas também o fluxo de informação para obter a informação em tempo real de como a rede de energia elétrica está funcionando. Utilizando as tecnologias da informação e comunicação, redes inteligentes serão capazes de melhorar a rede de distribuição de energia elétrica, visando maior eficiência na entrega de energia e controlar

**Figura 1:** Framework de sistemas inteligentes de uma cidade

Fonte: (INTEL, 2012)

em tempo real a sua produção. Portanto, uma infraestrutura de informação inteligente é fundamental para a implementação da *Smart Grid*. Na Figura 2 é apresentado o *framework Smart Grid* proposto pelo *NIST - National Institute of Standards and Technology*.

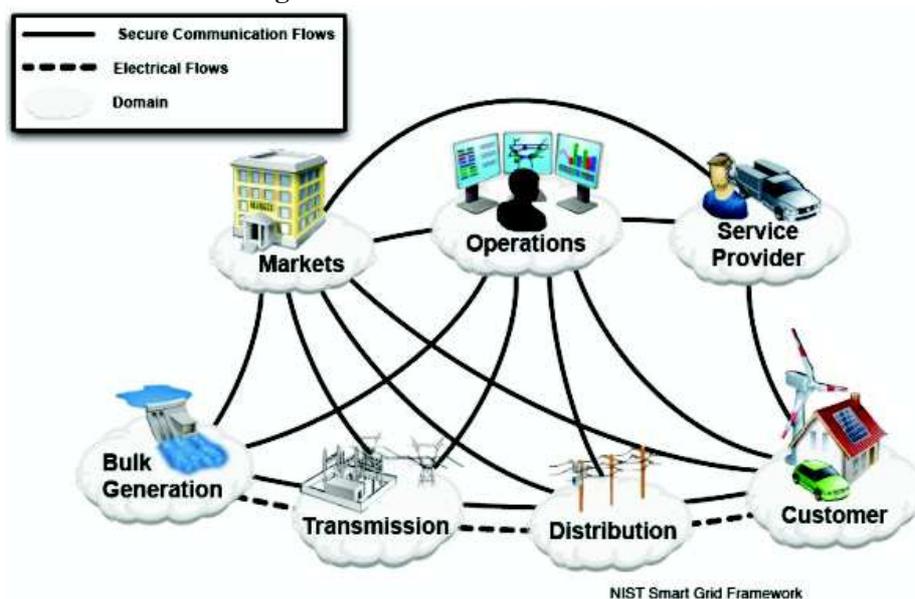
Em Fang et al. (2012), o sistema de rede inteligente é dividido em três subsistemas, cada um responsável por uma função específica no ambiente de rede inteligente. O primeiro é o subsistema de energia inteligente, responsável por um melhor sistema de produção, transmissão e distribuição de energia. Em segundo, o subsistema de informação inteligente, encarregado de coletar as informações e sua gestão. Como exemplo, medição inteligente é parte deste subsistema. Medidor inteligente, o aplicativo mais importante desta classe, fornece informações em tempo real sobre o consumo de gás ou eletricidade para os usuários e também para as empresas de distribuição de energia (MARTINS, 2013). Acredita-se que a utilização de contadores inteligentes irá reduzir, consideravelmente, o consumo de energia. O terceiro subsistema na arquitetura de *Smart Grid*, é o subsistema de comunicação inteligente, responsável por apoiar o fluxo bidirecional de informações.

Redes de sensores sem fio (*WSN* do inglês – *Wireless Sensor Network*) são utilizadas para gerenciar um sistema de energia inteligente e para detectar falhas. O uso de sensores tem muitas exigências em termos de qualidade de serviço, demanda de recursos, manutenção e demanda alta confiabilidade na transmissão de dados (FANG et al., 2012).

### **Estacionamento Inteligente (*Smart Parking*)**

Os sistemas de estacionamento estão enfrentando muitos problemas com o número de veículos nas cidades, que aumenta rapidamente. O sistema de estacionamento inteligente está

**Figura 2:** *Framework Smart Grid - NIST*



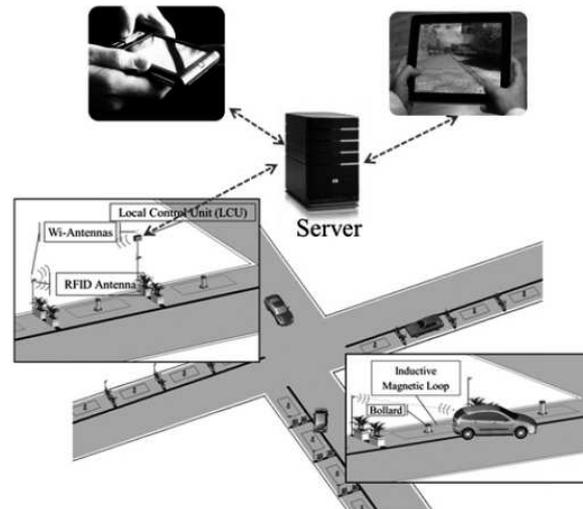
Fonte: (NIST; PUBLICATION; National Institute of Standards and Technology, 2010)

sendo implantado como uma solução para esse problema (PIRO et al., 2014). A utilização generalizada das tecnologias sem fio, como redes de sensores sem fio e, em geral, as melhorias em aplicações sem fio, pode ser uma solução para os desafios de estacionamento. Redes de sensores sem fio parecem ser a melhor alternativa devido ao seu baixo custo de implantação nos lugares de estacionamento existentes e baixo consumo de energia. Em um ambiente de estacionamento inteligente, sensores sem fio serão colocados em cada vaga de estacionamento, e serão capazes de coletar e transmitir dados para o administrador do estacionamento.

Em Tesoriere et al. (2014), este sistema é descrito com uma abordagem em três camadas, como mostrado na Figura 3. O nível mais baixo é a função de detecção. Através da utilização de sensores distribuídos no espaço de estacionamento, será possível conhecer, em tempo real, os espaços livres deixados. O segundo nível é a transmissão de dados e o nível superior é o de processamento e armazenamento de dados e interface do cliente.

### **Monitoramento de Tráfego por Vídeo (*Traffic Video Monitoring*)**

O conceito de cidade inteligente está apontando para uma cidade que é mais segura e que consegue gerir de forma mais autônoma seus recursos. Estes incluem o sistema de transporte que é de grande importância para o desenvolvimento de qualquer cidade. Quanto mais as pessoas escolhem viver nos centros das cidades, o gerenciamento de um sistema, como uma rede de estradas, torna-se cada vez mais complexo e desafiador. Uma infraestrutura de monitoramento de vídeo em toda a cidade, focado em locais críticos, irá auxiliar na gestão de tráfego mais eficiente. A implantação de câmeras nos cruzamentos, a fim de controlar os semáforos e o fluxo de veículos com base na imagem fornecida pelas câmeras é, provavelmente, a aplicação mais evidente (FIRMINO; TREVISAN, 2012). Numa cidade inteligente, no entanto, os dados dos sensores podem ser recuperados a partir de uma variedade de aplicações através de dispositivos

**Figura 3:** *Framework Smart Parking*

Fonte: (TESORIERE et al., 2014)

pertencentes a redes heterogêneas. Sistemas inteligentes de transporte do futuro, por exemplo, podem aproveitar a rede de câmeras para informar o condutor acerca de colisões e redirecionar o fluxo de veículos. A rede de comunicações deveria ser concebida e ter a capacidade de lidar com o tráfego de rede que pode ser produzido por qualquer dispositivo / sistema, de uma forma que permite uma cooperação perfeita com o resto dos sistemas inteligentes da cidade.

## 2.2 Topologias de Redes de Acesso

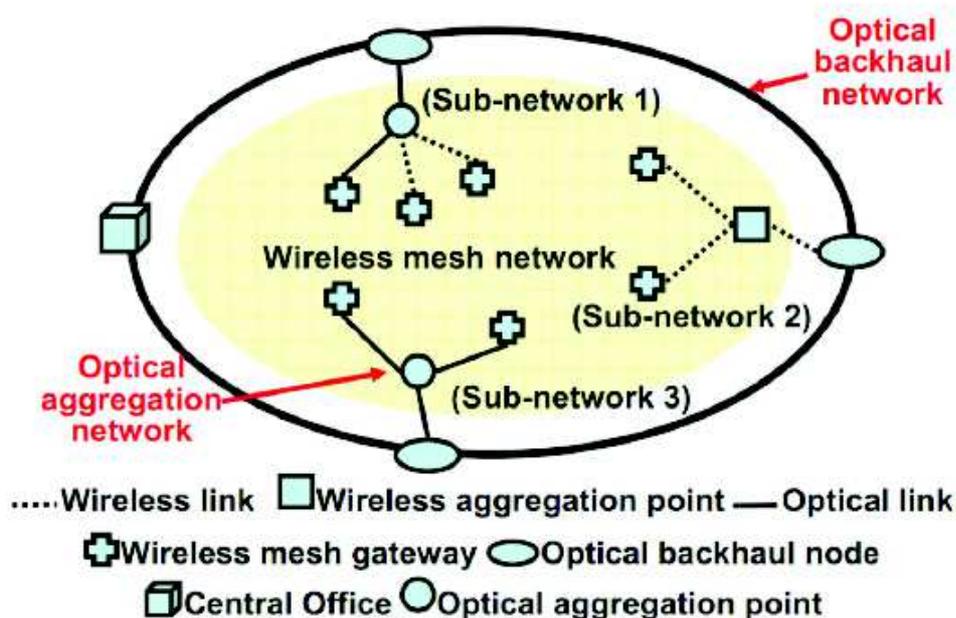
O escopo desta seção é o de prover uma visão geral sobre diferentes arquiteturas de rede, tecnologias e topologias que contribuem para o planejamento de uma rede para uma cidade inteligente. Elas descrevem diversas arquiteturas de redes híbridas ópticas - sem fio que podem ser implementadas num ambiente de uma cidade inteligente.

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 à 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*. A combinação dos fatos mencionados conduziu a pesquisa para soluções híbridas ópticas – sem fio para adquirir a inspiração e o conhecimento aplicável ao projeto atual. Ainda neste seção, várias arquiteturas de rede de acesso híbridas são mencionadas, enfatizando as vantagens de cada uma.

### 2.2.1 Metro Access Ring Integrated Network (MARIN) architecture

*MARIN*<sup>1</sup> é uma topologia de rede de acesso híbrida (óptica – sem fio) projetada para uma rede metropolitana. Sua topologia inclui um anel óptico de ligação intermediária, onde múltiplas árvores de redes são conectadas. As terminações destas redes (os *gateways* sem fio), formam entre eles uma rede *mesh* sem fio. (KAZOVSKY et al., 2012), (SHAW W. T., 2007)

Figura 4: Arquitetura de rede MARIN



Fonte: (KAZOVSKY et al., 2012)

Esta arquitetura (conforme demonstrado na Figura 4) é composta por vários elementos de rede:

- *Hub* central óptico (*Central Office*) que liga o anel óptico para a rede WAN;
- Nós de rede ópticos (*Optical Backhaul Node*), cuja função é encaminhar o tráfego a partir do *hub* central até os nós de agregação ópticos;
- Nós de agregação ópticos (*Optical Agregation Network*) que concentram o tráfego dos *gateways* sem fio ópticos;
- *Gateways* ópticos sem fio (*Wireless aggregation point - Optical link*) que representam a interface entre a árvore da rede óptica e a rede *mesh* sem fio. Eles podem lidar com o tráfego de ambas as redes. Seu papel é rotear o tráfego sem fio para a rede de fibra óptica;
- Roteadores *mesh* sem fio (*Wireless mesh gateway*) que só podem lidar com o tráfego da rede sem fio.

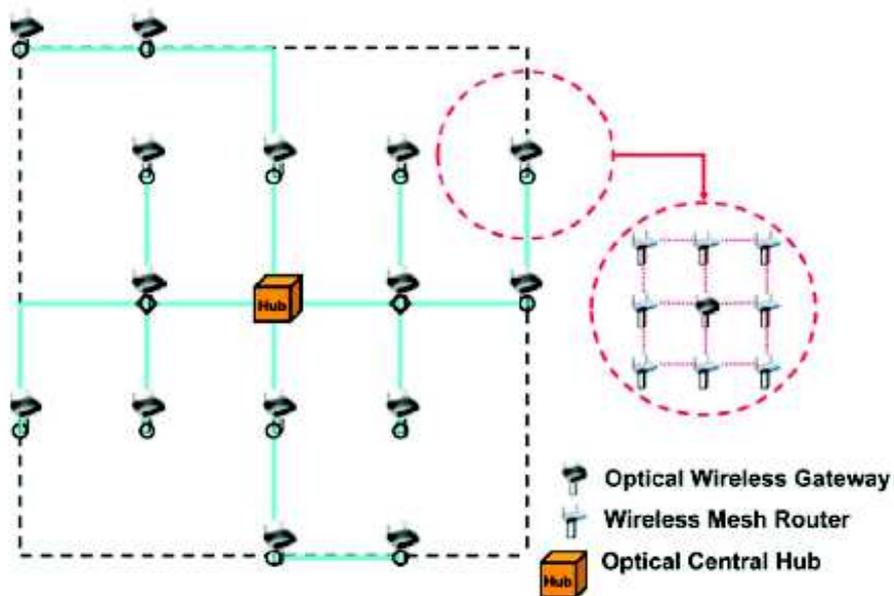
<sup>1</sup>Tradução literal do autor para o termo MARIN - Rede de acesso metropolitana integrada em anel.

*MARIN* é uma arquitetura de rede conveniente para as cidades devido a sua escalabilidade e alto desempenho do *backbone* óptico, capaz de suportar a próxima geração de redes sem fio onipresente (KAZOVSKY et al., 2012).

### 2.2.2 Grid Reconfigurable Optical and Wireless Network (*GROWNet*)

*GROWNet*<sup>2</sup> é uma arquitetura de banda larga projetada para o acesso óptico sem fio híbrido implementado no cenário de uma cidade (SHAW et al., 2009). De acordo com esta arquitetura células ópticas são implantadas ao longo da cidade formando o que é chamado de grade óptica. Em cada célula, há uma rede *mesh* sem fio. A Figura 5 ilustra a arquitetura *GROWNet*.

Figura 5: Arquitetura *GROWNet*



Fonte: (KATARA et al., 2013)

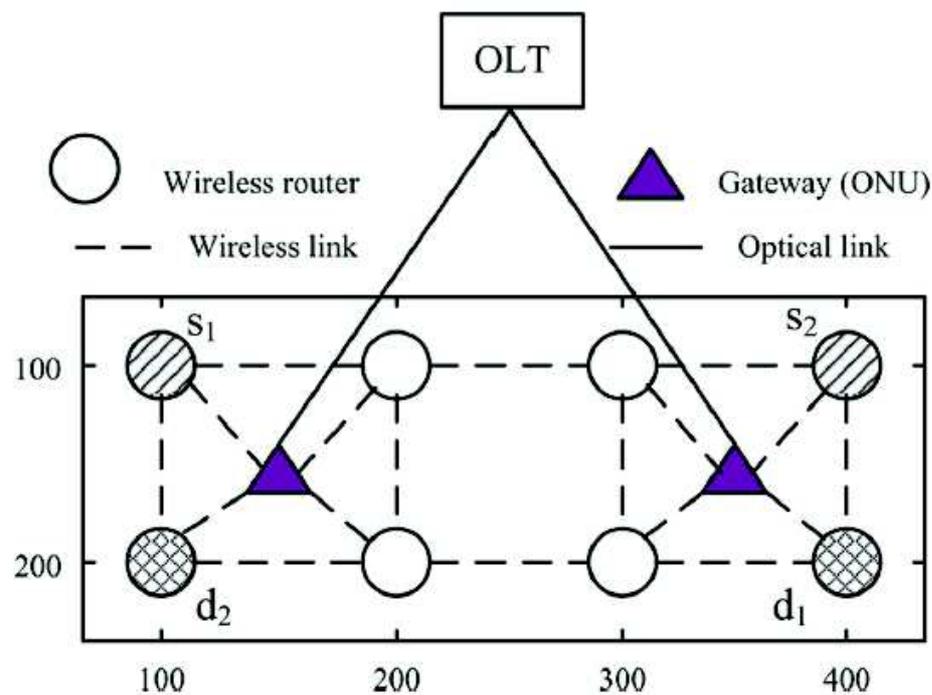
A principal vantagem desta arquitetura é a alta capacidade fornecida, uma vez que traz a rede de fibra óptica com mais capilaridade na cidade, e a onipresença da rede com a rede *mesh* sem fio (SHAW et al., 2009), (KATARA et al., 2013). Outro trunfo da arquitetura *GROWNet* é a chamada “Respiração celular”. Esta técnica consiste em mudar o conjunto de células de acordo com o tráfego produzido dentro da célula e, por conseguinte, o número de usuários, mudando o poder de transmissão.

<sup>2</sup>Tradução literal do autor para o termo GROWNet - Rede em grade reconfigurável de fibra óptica e sem fio.

### 2.2.3 Fiber-Wireless Access Network (FiWi)

O foco principal da arquitetura *FiWi*<sup>3</sup> é a comunicação ponto a ponto entre nós sem fio. Para atingir o seu objetivo de maior rendimento, os nós sem fio são interconectadas a *ONUs* - *Optical Network Units*. Além da maior taxa de transferência devido ao caminho óptico confiável, também reduz a interferência do canal devido à redução dos “*wireless hops*”. Uma das arquiteturas baseadas neste conceito é apresentada em Li et al. (2010) e Ghazisaidi e Maier (2011). Ela difere das demais, pois introduz a ideia de uma comunicação direta entre as *ONUs*, bem como um método de alocação de largura de banda dinâmica distribuída. A parte óptica da rede consiste em um híbrido *Wavelength Division Multiplexed / Time Division Multiplexed Passive Optical Network* (WDM / TDM PON), onde o tráfego das *ONUs* não precisa ir até o Terminal de Linha Óptica (*OLT*). A Figura 6 ilustra a arquitetura *FiWi*:

Figura 6: Arquitetura *FiWi*



Fonte: (LI et al., 2010)

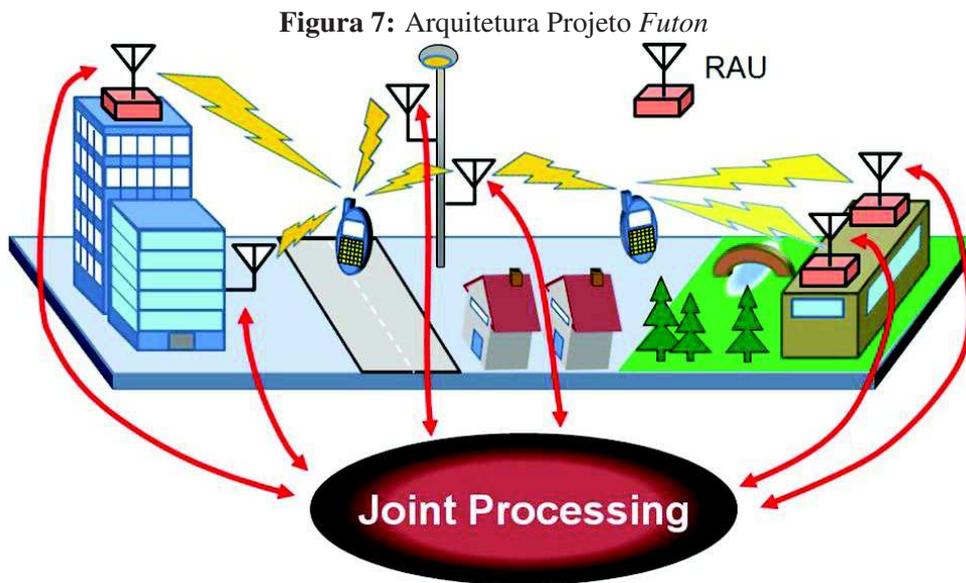
### 2.2.4 FUTON

O projeto *Futon*<sup>4</sup> é uma arquitetura híbrida, usada em sistemas sem fio (FUTON, 2015). Esta arquitetura utiliza estações rádio base simplificadas chamadas *Radio Access Units (RAU)* em vez da tradicional Estação Rádio Base (ERB) para cobrir uma área ligada através de fibra

<sup>3</sup>Tradução literal do autor para o termo FiWi - Rede de acesso de fibra óptica e sem fio.

<sup>4</sup>Tradução literal do autor para o termo FUTON - Rede de fibra óptica para extensão heterogênea e distribuída de arquitetura de rádios para provisionamento de serviços.

óptica até a Unidade Central (UC). Os RAUs são transceptores multi-frequência transparentes, que recebem e transmitem sinais de rádio aos usuários. A partir do RAU, os sinais de rádio serão retransmitidos para a UC usando Rádio sobre Fibra (RoF), onde o tratamento conjunto dos sinais de rádio ocorre.



Fonte: (FUTON, 2015)

Esta arquitetura permitirá que as altas taxas de largura de banda, almejadas pelos futuros sistemas sem fio, proporcionem uma maior integração de redes sem fio heterogêneas.

### 2.2.5 *Wireless-Optical Broadband Access Network (WOBAN)*

A arquitetura *WOBAN*<sup>5</sup> consiste de uma ligação intermediária óptica (*PON* do inglês *Passive Optical Network*) e a conexão final aos usuários sem fio (CHOWDHURY et al., 2010). Nesta arquitetura, o segmento *PON* inicia a partir da *OLT* na unidade central da rede e termina na *ONU*. A parte de acesso dos usuários é composta por roteadores sem fio que formam uma rede *mesh* sem fio entre eles. Dentre estes roteadores, alguns deles servem como *gateways* e estão ligados a *ONU*. A Figura 8 mostra a arquitetura *WOBAN*.

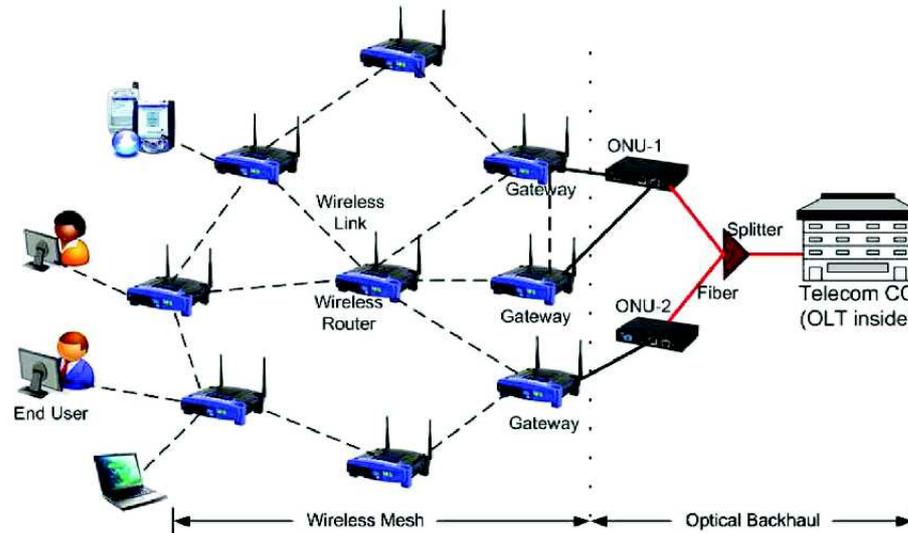
Esta arquitetura maximiza a largura de banda disponibilizada para as redes de banda larga e minimiza o custo de implantação devido à relação custo-benefício das redes de acesso sem fio (CHOWDHURY et al., 2010), (KAZOVSKY et al., 2012).

## 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

<sup>5</sup>Tradução literal do autor para o termo WOBAN - Rede de acesso de banda larga óptica-sem fio.

**Figura 8:** Arquitetura *WOBAN*



Fonte: (CHOWDHURY et al., 2010)

outra tecnologia com fios. Devido à 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 em longas distâncias. Um exemplo de uso é o da tecnologia *WDM*, onde múltiplos comprimentos de onda são enviados simultaneamente, atingindo altas velocidades de transmissão na ordem de terabits/s. As fibras ópticas já desenvolvidas utilizam até 32 comprimentos de onda, oferecendo larguras de banda de até 320 Gbps, sendo que cada comprimento de onda pode transportar até 10 Gbps de dados. Pesquisas experimentais mostram que o número de canais em uma única fibra monomodo pode ser ainda maior, em torno de 72 canais ou mais, suportando assim larguras de banda ainda maiores.

Vantagens do uso de fibra óptica:

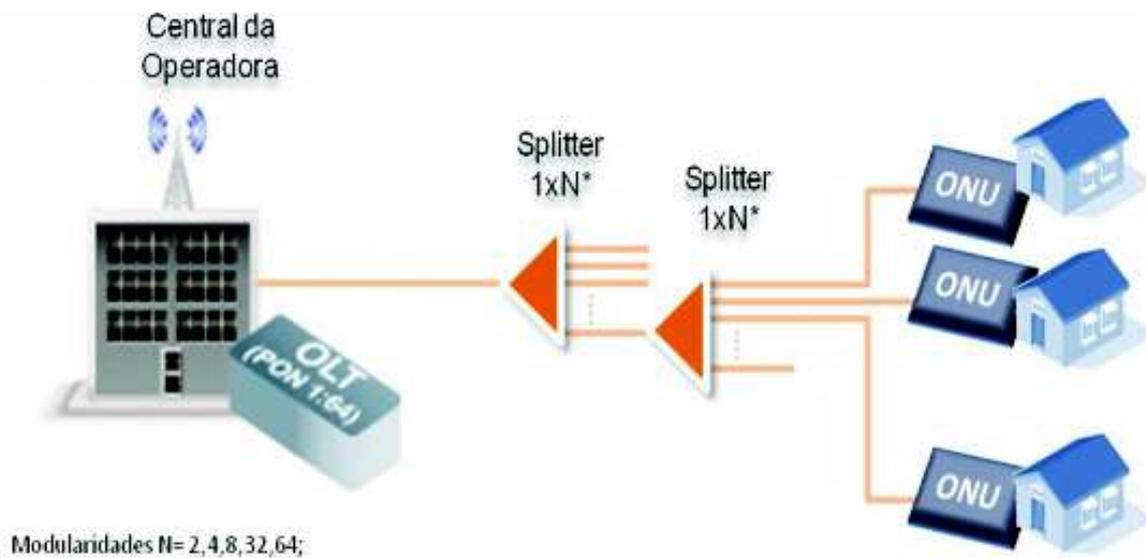
- Altas taxas de transferência de dados, da ordem de terabits/s em condições de laboratório;
- Utilização em longas distâncias devido à baixa atenuação;
- Nenhum campo eletromagnético externo, proporcionando segurança contra *sniffing* da rede;
- Baixa taxa de erro na ordem de  $10^{-10}$ .

### 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 estrutura para atender os clientes nas redes de acesso. (SEGARRA; SALES; PRAT, 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*, visto na Figura 9. O *splitter* 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.

**Figura 9:** Esquema visual do *splitter*



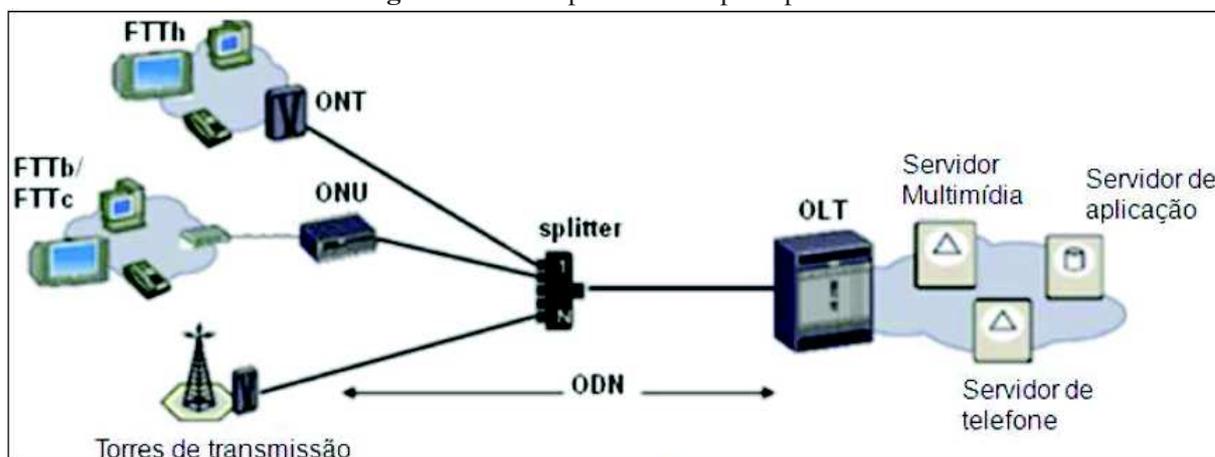
Fonte: (FURUKAWA, 2015)

O sinal de uma fibra pode ser dividido em  $2^n$  fibras, atualmente  $n$  varia de 2 a 64 (também pode-se dizer que a razão de separação é de  $2^n$ ). A Figura 9 ilustra como o *splitter* separa uma fibra em mais fibras, em um exemplo de uma rede, neste caso, a fibra é capaz de atender diversos clientes.

As divisões de uma PON são mostradas na rede da Figura 10. Os clientes estão conectados em uma Unidade de Rede Óptica (*ONU*) ou em um Terminal de Rede Óptica (*ONT*) de uma fibra, que foi dividida no *splitter* do sistema da Rede de Distribuição Óptica (*ODN* do inglês *Optical Distribution Network*), e conectada ao Terminal de Linha Óptica (*OLT* do inglês *Optical Line Terminal*). Isto mostra que é possível conectar vários clientes com somente uma fibra na

OLT.

Figura 10: Exemplo de rede óptica passiva



Fonte: (TELECO, 2015)

A rede *PON* é uma evolução da arquitetura de rede ponto - multiponto, que tem como principal característica a não utilização de energia elétrica percorrendo seu meio físico (AGRAWAL, 2014). Por isso, leva o nome de rede óptica passiva, ou seja, seus elementos responsáveis pela distribuição do sinal (*splitters*) são totalmente passivos.

As tecnologias mais utilizadas, atualmente em redes ponto - multiponto são, *EPON/GEPON* e *GPON*, sendo:

***EPON***: *Ethernet Passive Optical Network*, mais conhecida como ***GEPON*** (*Gigabit Ethernet Passive Optical Network*);

***GPON***: *Gigabit Passive Optical Network*.

O *EPON* é um padrão desenvolvido pelo *IEEE*, do inglês *Institute of Electrical and Electronics Engineers*, através de uma iniciativa do grupo *EFM*, do inglês *Ethernet in the first mile* - (Ethernet na primeira - ou última - milha). A organização responsável pelo *EPON* é o *IEEE* e suas especificações estão definidas no IEEE 802.3ah (IEEE, 2015).

A velocidade de transferência no *EPON* é simétrica, de 1,25 Gbps, ou seja, possui essa velocidade tanto no sentido de *downstream* quanto no *upstream*. No sentido de *downstream* no *EPON*, os pacotes da *OLT* são enviados via *broadcast* para todas *ONTs/ONUs*, como é padrão no *Ethernet*, a *ONT/ONU* seleciona qual pacote é seu e o resto descarta. No sentido de *upstream*, o comportamento do *EPON* é similar a uma arquitetura ponto a ponto: o *EPON* adota o *TDM*, ou seja, cada *ONT/ONU* transmite os quadros *Ethernet* para a *OLT* com intervalos de tempo de transmissão diferentes, atribuídos pela *OLT*.

O *GPON* é um padrão definido pelo *ITU-T*, do inglês *International Telecommunication Union* e suas especificações e recomendações estão definidas nos documentos técnicos G.984.x (G.984.1, G.984.2, G.984.3, G.984.4, G.984.5, G.984.6) (ITU-T, 2005).

As velocidades de transferência no *GPON* são assimétricas, ou seja, diferentes nos sentidos de *downstream* e *upstream*. No sentido de *downstream*, a velocidade de transferência é de 2,5

Gbps, já no sentido de *upstream* a velocidade de transferência é de 1,25 Gbps (ITU-T, 2008).

O comportamento dos pacotes de dados nos sentidos de *downstream* e *upstream* são semelhantes aos do *EPON*, a diferença é somente que no *GPON* o formato do *frame* (quadro de informação) contém células *ATM*.

A Tabela 1 mostra um comparativo de características principais das tecnologias *GEPON* x *GPON*.

**Tabela 1:** Comparativo características *GEPON* x *GPON*

Características	EPON/GEPON	GPON
Padrões	IEEE 802.3ah	ITU-T G.984
Protocolo	Ethernet e TDM	ATM, TDM e Ethernet
Velocidade de Transmissão	1,25 GBps - Downstream 1,25 Gbps - Upstream	2,5 GBps - Downstream 1,25 Gbps - Upstream
Comprimento de onda	1490 nm - Downstream 1310 nm - Upstream	1490 nm - Downstream 1310 nm - Upstream
Distância (Km)	10	20
Número de divisões	16 ou 32	32 ou 64
Tamanho do pacote de dados	1518 bytes	Variável de 53 até 1518 bytes
Compatibilidade de Fabricantes	Permite	Não permite

Fonte: (TELECO, 2015)

## 2.4 Tecnologias de Redes sem fio

O acesso sem fio é onipresente e de abrangência flexível para os usuários finais, e também oferece boas soluções para abordar a questão da mobilidade nas redes de acesso (KAZOVSKY et al., 2012). Nesta seção, as principais tecnologias de acesso sem fio são apresentadas e comparadas.

### 2.4.1 *Wireless Local Area Network* - WLAN

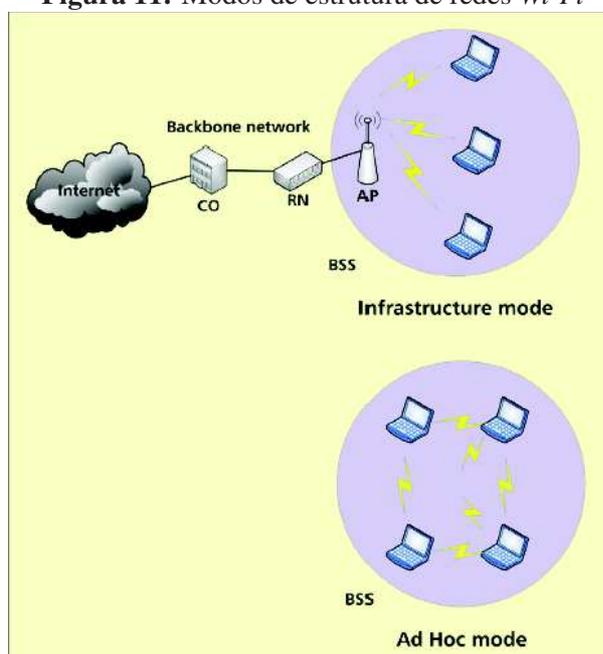
*WLAN*<sup>6</sup> é uma tecnologia de rede local sem fio que usa ondas de rádio para fornecer conexões de rede e internet de alta velocidade. Mais comumente conhecida como *Wi-Fi*,<sup>7</sup> é baseada em padrões IEEE 802.11 e se desenvolveu extensivamente nos últimos 15 anos para redes locais sem fio (*WLANs*). A popularidade das *WLANs*, baseada no padrão IEEE 802.11, é devida ao baixo custo, taxa de transferência de dados de alta velocidade e fácil implantação (SHADDAD et al., 2014).

<sup>6</sup>Tradução literal do autor para o termo *WLAN* - Rede local sem fio

<sup>7</sup>A *Wi-Fi Alliance*, a organização que possui o *Wi-Fi* (marca registrada), termo define especificamente *Wi-Fi* como produtos de rede local sem fio que são baseados nos padrões IEEE 802.11.

Existem dois modos de estrutura de *Wi-Fi*: modo de infraestrutura e modo *ad-hoc*. No modo de infraestrutura, um *AP*, do inglês *Access Point*, está conectado a uma rede *backbone* que fornece os serviços de internet necessários para o *AP* a partir de uma Central de Telecomunicações. Já o modo *ad-hoc* autoriza autogestão para todos os usuários e não atribui a qualquer usuário o papel de administrador. A Figura 11 mostra os dois tipos de modos de estrutura *Wi-Fi*. Um ou mais nós sem fio, ao longo do nó central e o *AP*, fazem um conjunto de serviços básicos. A maioria dos nós sem fio em infraestrutura estão ligados a *backbones* com fio. A infraestrutura também é configurada para funcionar em dois modos: o modo *P2MP* ou *mesh*. No modo *mesh*, roteadores *mesh* podem se comunicar uns com os outros de uma forma *multi-hop*, sem intervenção direta dos *APs*. Uma rede *ad-hoc* é uma rede sem controle central, cada nó sem fio pode se comunicar com outro nó diretamente.

**Figura 11:** Modos de estrutura de redes *Wi-Fi*



Fonte: (SHADDAD et al., 2014)

#### 2.4.2 Wireless Metropolitan Area Network - WMAN

*WMAN*<sup>8</sup> é uma tecnologia de rede sem fio de acesso com base no padrão IEEE 802.16. Ela é projetada para atender as necessidades de redes metropolitanas sem fio (*WMAN* do inglês *Wireless Metropolitan Area Network*) mais comumente conhecida como *WiMAX*. A estação rádio base *WiMAX* pode suportar uma taxa de dados total de até 75 MB/s para usuários residenciais e empresariais dentro de um raio de 5 km de alcance (SHADDAD et al., 2014). *WiMAX* oferece alta largura de banda e usa espectro menos ocupado. Dependendo do uso das aplicações, o padrão IEEE 802.16 pode ser configurado para funcionar em dois modos: o modo *mesh* ou

<sup>8</sup>Tradução literal do autor para o termo WMAN - Rede metropolitana sem fio

*P2MP*. No modo *P2MP*, uma estação rádio base (ERB) serve vários pontos de assinante (PAs) que são abrangidos pela ERB. No modo *mesh*, PAs podem se comunicar uns com os outros de uma forma *multi-hop*, sem intervenção direta da ERB. *WiMAX* usa uma modulação adaptativa com diferentes níveis de correção de erros para otimizar a taxa de transmissão e desempenho e reduzir a taxa de erro.

### 2.4.3 Wireless Mesh Network - WMN

As novas gerações de rede sem fio devem ter um adequado custo-benefício e capazes de serem implantadas em grandes áreas de cobertura, proporcionando alta taxa de transferência de dados, e suportar serviços de banda larga aos usuários finais da rede sem fio (*WEU*, do inglês – *Wireless End User*). A rede sem fio *mesh* oferece uma arquitetura promissora para alcançar esses requisitos. A *WMN*<sup>9</sup> emprega sistema de comunicação “*multi-hop*” de forma eficaz. Então, as *WMNs* estendem a cobertura de ilhas *Wi-Fi* para fornecer redes sem fio de alta largura de banda e flexíveis. As *WMNs* podem operar em qualquer uma das técnicas de *Wi-Fi* ou *WiMAX*. A estrutura de uma *WMN* compreende vários *APs* que estão ligados ao *backbone* da internet com fio, um grupo de roteadores *mesh* sem fio que fornecem comunicações “*multi-hop*” sem fio e um grupo de *WEUs* como mostrado na Figura 12. A *WMN* usa os roteadores *mesh* sem fio para fornecer conectividade *multi-hop* entre os *WEUs* e os *APs*. Além disso, o usuário final pode enviar e receber dos seus roteadores *mesh* associados disponíveis usando canais específicos sem fio de entrada e saída de dados.

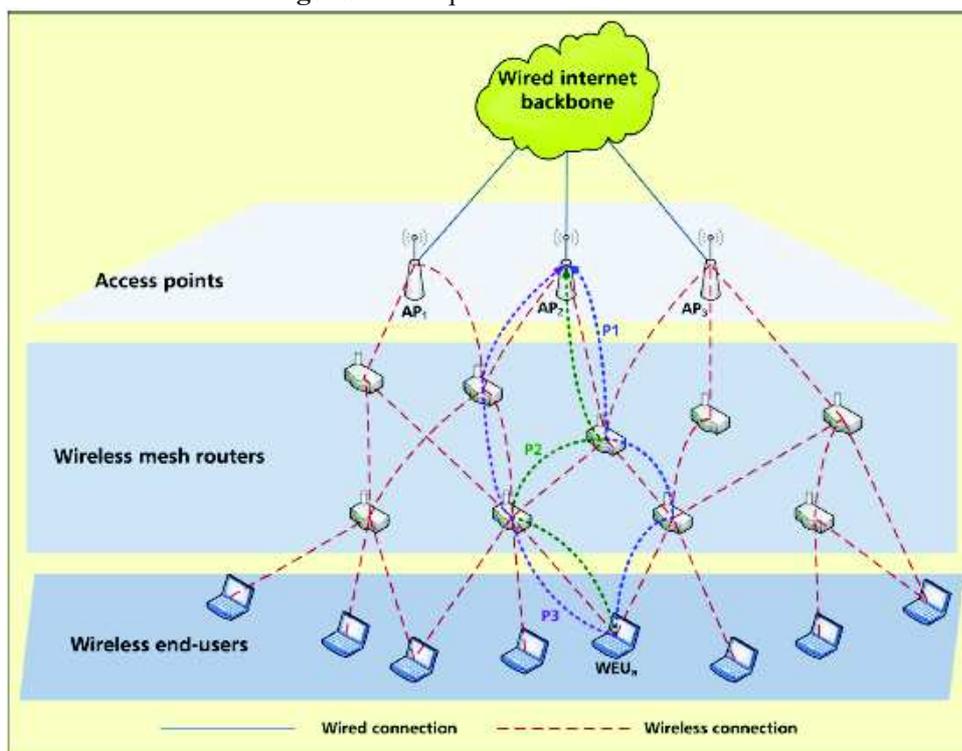
Uma das vantagens mais importantes de uma *WMN* é que possui conectividade autoconfigurável em grandes áreas (SHADDAD; MOHAMMAD; AL-HETAR, 2011). Como mostrado na Figura 12, os roteadores sem fio *mesh* de forma automática estabelecem e mantêm a conectividade, como indicado pela linha pontilhada, e os pontos de acesso (AP1, AP2 e AP3) possuem uma conexão com a internet através do *backbone* de internet com fio. O tráfego de saída do usuário final é coletado pelo roteador sem fio *mesh* disponível nas proximidades. Se o ponto de acesso AP2 é a porta de destino para um usuário final sem fio (*WEU*), os pacotes são transmitidos para este ponto de acesso de um dos caminhos disponíveis, tais como o percurso P1, P2 ou P3, tal como ilustrado na Figura 12.

## 2.5 Redes híbridas de acesso ópticas e sem fio

As futuras tecnologias de redes de acesso devem fornecer implementação flexível, grande capacidade de *backbone*, capacidade de expansão e escalabilidade para a demanda de rede e número de usuários (SHADDAD et al., 2014). Uma rede de acesso de banda larga híbrida óptica - sem fio é uma combinação ideal de um *backhaul - backbone* óptico e acesso aos usuários finais. Uma interface flexível óptica - sem fio é dependente da demanda de tráfego, e necessita de pre-

<sup>9</sup>Tradução literal do autor para o termo WMN - Rede sem fio em malha

Figura 12: Arquitetura da rede WMN



Fonte: (SHADDAD et al., 2014)

missas como: escalabilidade, custo-benefício, *backhaul* de banda larga óptico, alta velocidade, confiabilidade e tecnologia de conexão sem fio onipresente (SHADDAD; MOHAMMAD; AL-HETAR, 2011) (SHADDAD et al., 2014). Esta arquitetura híbrida é uma solução de acesso promissora para as redes locais e metropolitanas.

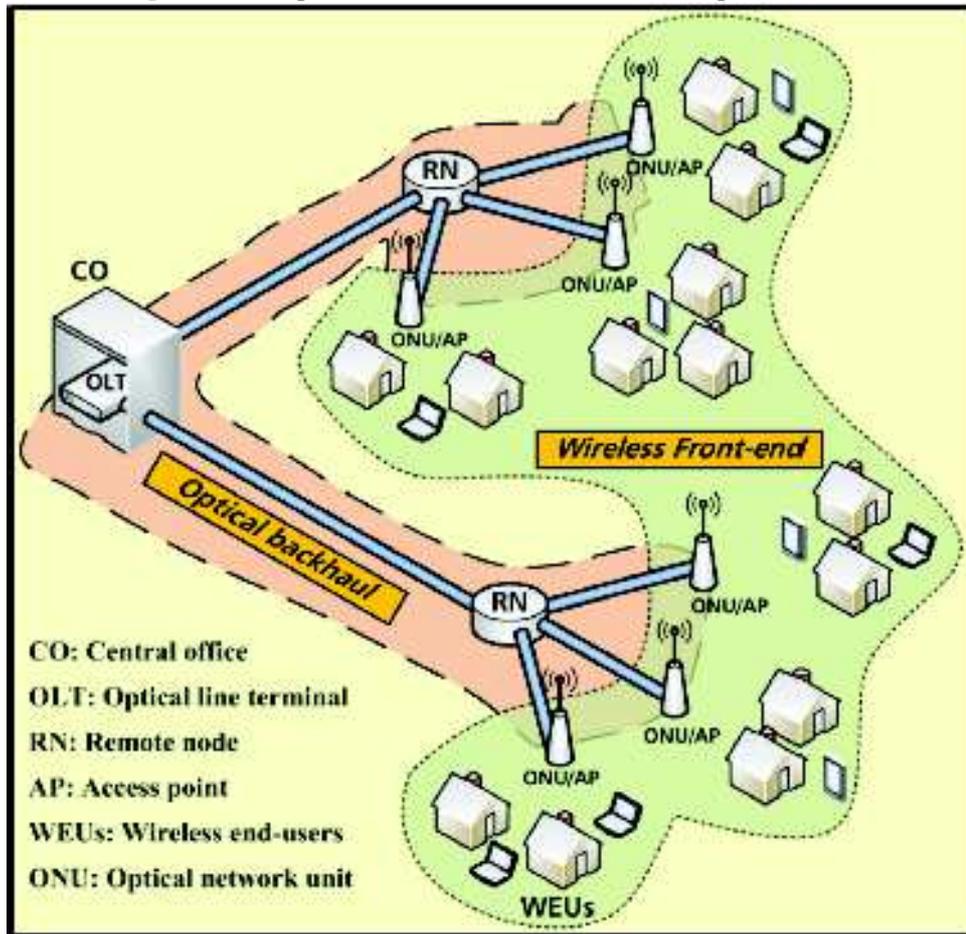
A Figura 13 mostra a arquitetura de rede de acesso híbrida óptica/sem fio. O *backhaul* óptico é uma rede de árvores que liga a unidade central aos usuários com acesso sem fio. O *backhaul* óptico compreende uma *OLT* na unidade central, pontos de repetição e várias *ONUs* com pontos de acesso para disponibilizar o sinal da rede sem fio aos usuários finais.

A partir dos conhecimentos obtidos com os conceitos apresentados, a proposta deste trabalho é a de aplicar modelos semelhantes de arquitetura para projetos de redes de fibras ópticas, levando em consideração:

- Definir a quantidade, capacidade e localização geográfica dos pontos de acesso a serem atendidos;
- Encontrar a quantidade, capacidade e localização geográfica dos *splitters* da rede *GPON*;
- Definir a capacidade e o trajeto dos cabos alimentadores para conectar os *splitters* à central de telecomunicações e entre os nós de demanda;

e considerar as seguintes restrições:

**Figura 13:** Arquitetura da rede de acesso híbrida óptica/sem fio



Fonte: (SHADDAD et al., 2014)

- A capacidade máxima de cada equipamento;
- A capacidade máxima de cabos;
- A distância máxima entre a central de telecomunicações e dos pontos de acesso;
- O custo dos equipamentos e cabos;
- O custo de instalação dos equipamentos e cabos;
- A posição geográfica dos equipamentos considerando:
  - Estradas;
  - Postes de energia;
  - Prédios e obras civis existentes na área.

## 2.6 Representação gráfica e numérica de redes de telecomunicações

A representação gráfica de redes de telecomunicações tem se utilizado da representação esquemática de grafos, que facilitam a compreensão das explicações tendo a vantagem da fácil apreensão pela percepção global humana no que se refere a alguns de seus aspectos topológicos (NETTO, 2011). Por outro lado, a representação esquemática não é adequada para fornecer a um computador dados sobre uma estrutura de grafo. Os dados relativos a um grafo precisarão sempre de uma representação numérica interna, com a qual o computador possa trabalhar. A seguir, será tratado o conceito da teoria dos grafos e sua forma de representação numérica para aplicação neste trabalho.

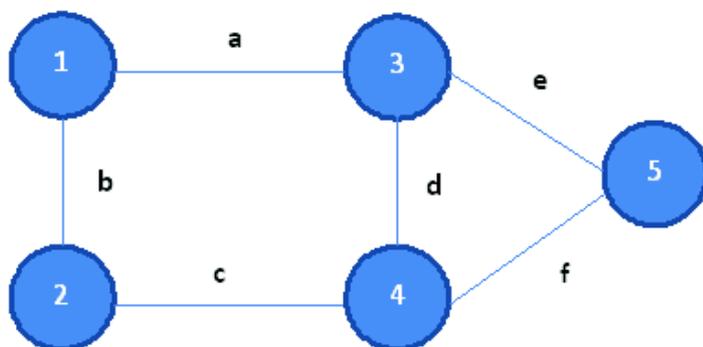
### 2.6.1 Teoria dos Grafos

Grafos são importantes ferramentas matemáticas com aplicações em diversas áreas do conhecimento, empregados com sucesso na solução de problemas computacionais (GROSS; YELLEN, 2006). Um grafo é matematicamente representado como uma tupla:

$$G = (V, A, \psi_G), \quad (2.1)$$

onde  $V$  representa os vértices (ou nós),  $A$  representa as arestas, também chamadas de ligações entre os vértices, e  $\psi_G$  a função que associa cada aresta do Grafo  $G$  a um par de vértices  $V$ . A Figura 14 mostra o exemplo de um grafo representado pelo conjunto  $G = (V, A)$ , onde  $V = \{1, 2, 3, 4, 5\}$  é o conjunto que representa os nós, enquanto as arestas são representadas pelo conjunto  $A = \{a, b, c, d, e, f\}$ .

**Figura 14:** Exemplo de um grafo



Fonte: Elaborado pelo autor

A representação matemática de um grafo, obtida de sua representação geométrica, pode ser idealizada por, pelo menos, três formas (GOLDBARG; LUNA, 2000):

- Matriz de adjacência;

- Matriz de incidência;
- Listas encadeadas.

Neste trabalho, a representação matemática dos grafos é apresentada na forma de matrizes de adjacências, pois esta forma expressa de maneira simples como os vértices se relacionam (adjacências) em um grafo e também um menor esforço computacional para acessar as informações (GOLDBARG; LUNA, 2000). Segundo Netto (2011), pode-se representar uma rede de telecomunicações utilizando a Teoria de Grafos. No seu trabalho, apresentou os nós como representação dos roteadores:

$$V = \{1, 2, \dots, ||V||\} \quad (2.2)$$

A representação dos *links* existentes entre os nós é representada pelas arestas:

$$\mathbf{A} = a_{ij}, \quad (2.3)$$

onde  $\mathbf{A}$  é uma matriz binária, na qual  $i$  e  $j$  representam os índices, linhas e colunas, respectivamente, que contém os valores 0, para ausência de *link*, ou 1, para a presença de ligação entre dois vértices.

No trabalho desenvolvido por Martins (2013), também utiliza-se da teoria de grafos para a representação de uma rede de comunicação para medidores de energia.

Para este trabalho, serão considerados grafos simples e não orientados representando a rede de comunicação de dados, pois todos os equipamentos envolvidos na infraestrutura são transceptores.

## 2.6.2 Representação de um Grafo por Matriz de Adjacências

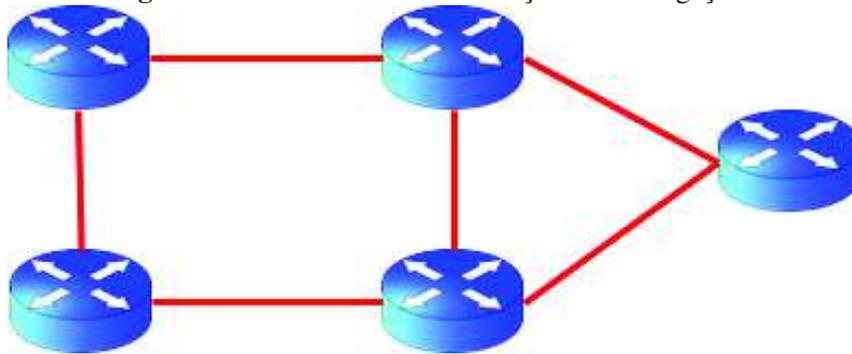
É uma representação simples onde um grafo é expresso por uma matriz  $\mathbf{A} = a_{ij}$  através dos nós e das relações entre as arestas. Os elementos destas matrizes são normalmente representados por 0-1 (booleana) (MARTINS, 2013). A função de ligação  $\psi_G$ , por definição, pode ser expressa pela equação:

$$\psi_G = \begin{cases} a_{ij} = 1, & \text{se existir ligação } (i, j), \\ a_{ij} = 0, & \text{se não existir ligação } (i, j). \end{cases} \quad (2.4)$$

Como exemplo, assume-se a rede de comunicação, representada na Figura 15, como uma rede estabelecida entre roteadores, que pode ser representada por um grafo simples, conforme apresentado na Figura 14.

A partir do grafo formado pela observação da rede, rapidamente é possível identificar a matriz de adjacências formada pela função de ligação dos nós  $\psi_G$ , exemplificando na equação (2.5):

**Figura 15:** Uma rede de comunicações e suas ligações



Fonte: Elaborado pelo autor

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

## 2.7 O Problema do Recobrimento

O principal objetivo de uma rede de comunicações para uma cidade inteligente é cobrir uma área geográfica, de modo a ter todos os clientes (pontos de acesso), pertencentes a esta área, atendidos pelo sinal da rede de comunicações.

Este problema pode ser tratado como o Problema do Recobrimento, um problema clássico de otimização combinatória. As definições do problema do recobrimento apresentam as funções objetivo e de restrições como uma função de otimização partindo de certas definições simples (NETTO, 2011).

O vetor existência define os nós existentes que representam as regiões aptas a serem um ponto de repetição para a rede *mesh* sem fio. Cada elemento do vetor representa uma variável binária que indica a instalação ou não do equipamento, mostrado na equação:

$$\mathbf{x} = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T \quad (2.6)$$

Na equação (2.6),  $T$  representa o operador de transposição do vetor e a variável  $x_i$  é um elemento inteiro e binário, definido pela equação (2.7):

$$x_i = \begin{cases} 1, & \text{se houver instalação do ponto } i, \\ 0, & \text{se não houver instalação.} \end{cases} \quad (2.7)$$

Esta definição é válida para:

$$x_i \in \{0, 1\}, \forall i = 1, \dots, n, \quad (2.8)$$

onde  $n$  define o número de regiões do problema.

De forma análoga, o vetor custo associa o custo de instalação de cada equipamento na região  $i$ :

$$\mathbf{c} = [c_1, c_2, \dots, c_n]. \quad (2.9)$$

A partir das definições destes dois vetores, é possível se obter a Função Objetivo do problema, expressa pela equação (2.10):

Minimizar:

$$z = \sum_{i=1}^n c_i x_i \quad (2.10)$$

Para a formulação das restrições, é criada a Matriz Densidade  $\mathbf{D}$  (bidimensional), expressa na forma da equação:

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & \cdots & d_{1n} \\ d_{21} & d_{22} & \cdots & d_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ d_{n1} & d_{n2} & \cdots & d_{nn} \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

onde cada elemento da matriz é definido por:

$$d_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{se } i = j \text{ ou se } i \text{ é adjacente a } j, \\ 0, & \text{caso contrário.} \end{cases} \quad (2.12)$$

Para garantia de que todas as regiões de instalação estejam cobertas, é necessário assegurar que todas as instalações possuam pelo menos uma adjacência. A partir desta condição, cada componente do vetor de restrições  $\mathbf{u}$  é definido pela equação (2.13).

$$u_i = \sum_{i=1}^n d_{ij} x_i \geq 1, \quad j = 1, \dots, n. \quad (2.13)$$

Para a equação (2.13), os elementos  $x_i$  do vetor  $\mathbf{x}$  foram definidos na equação (2.7) e os elementos  $d_{ij}$  da matriz  $\mathbf{D}$  foram definidos na equação (2.12).

Estando definidas a função objetivo e as restrições, com todas as variáveis de entrada, a formulação do problema do recobrimento é dada pelo seguinte modelo de otimização:

Minimizar

$$z = \sum_{i=1}^n c_i x_i; \quad (2.14)$$

Sujeito a:

$$\sum_{i=1}^n d_{ij} x_i \geq 1; \quad (2.15)$$

com:

$$x_i \in \{0, 1\}, \forall i = 1, \dots, n, \quad (2.16)$$

onde, na equação (2.14),  $c_i$  representa o elemento de índice  $i$  do vetor custos  $\mathbf{c}$ ,  $x_i$  é o elemento de índice  $i$  do vetor existência  $\mathbf{x}$  e  $d_{ij}$  é um elemento da matriz densidade  $\mathbf{D}$ .

Na forma matricial, o problema do recobrimento pode ser descrito pela equação:

Minimizar

$$z = \mathbf{c}\mathbf{x} \quad (2.17)$$

Sujeito a:

$$\mathbf{D}\mathbf{x} \geq \mathbf{1} \quad x_i \in \{0, 1\}, \quad \forall i = 0, 1, \dots, n. \quad (2.18)$$

O Problema do Recobrimento pode ser reduzido a classes de problemas genéricos da Pesquisa Operacional. Este tipo de problema se caracteriza como da classe de problemas NP-difícil, isto é, uma classe de problemas cuja função de tempo computacional necessário para a resolução é não polinomial (GROSS; YELLEN, 2006). Desta forma, a resolução do problema através de algoritmos exatos para instâncias com dados reais é inviável do ponto de vista prático.

## 2.8 O Problema da Árvore Geradora Mínima

O problema da árvore geradora mínima (PAGM) consiste em encontrar, dado um grafo com arestas ponderadas, uma estrutura de conexão (árvore) em que todos os nós (geradora) se conectem (direta ou indiretamente) uns aos outros. Essa estrutura deve possuir o menor peso possível, onde o peso é dado pela soma dos pesos das arestas escolhidas (mínima).

Seja  $G = (V, A)$  um grafo não direcionado e conexo com um conjunto de nós  $V = \{0, 1, \dots, v\}$  e um conjunto de arestas  $A$ . Cada nó  $i \in V$  tem um peso  $b_i \geq 0$  com  $b_0 = 0$ . O peso do nó pode ser interpretado como uma demanda requerida. Cada aresta  $(i, j) \in A$  tem um custo  $c_{ij}$  associado a sua utilização na árvore geradora. O problema da árvore geradora mínima capacitada (PAGMC) consiste em determinar uma árvore geradora de custo mínimo sobre  $G$ , centralizada sobre o nó 0 (raiz), com a restrição adicional de que a soma dos pesos dos nós de qualquer sub-árvore conectada à raiz não pode ser maior que uma constante  $Q$ .

Quando todos os pesos dos nós são iguais, temos a versão homogênea do problema que pode ser tratado como um problema de demanda unitária. Para  $2 < Q < n/2$ , no trabalho de Papadimitriou e Lewis (1998) foi demonstrado que o problema é da classe NP-difícil.

### 2.8.1 Problema da Árvore Geradora Mínima Capacitada em Níveis

O problema da árvore geradora mínima capacitada em níveis (PAGMCN) é uma generalização do PAGMC, sendo a primeira pesquisa apresentada sobre o assunto feita por Gamvros, Raghavan e Golden (2002). A diferença entre o PAGMC e o PAGMCN é que no segundo problema é permitida a instalação de facilidades com capacidades distintas.

No PAGMCN, são dados um grafo  $G = (V, A)$ , com um conjunto  $N = \{0, 1, 2, \dots, n\}$ , onde o nó 0 representa o terminal central de onde o fluxo deve sair e os outros são os consumidores,

e um conjunto de arcos  $A$ ,  $b_i$  sendo a demanda de tráfego (ou peso) do nó  $i$  a ser transportada do nó 0, facilidades do tipo  $1, 2, \dots, L$  com capacidades  $Z_1 < Z_2 < \dots < Z_L$  e uma função de custo  $c_{ij}^l$  denotando o custo de uma facilidade do tipo  $l$  instalada entre os nós  $i$  e  $j$ . O objetivo então, assim como PAGMC, é o de encontrar uma rede de custo mínimo para transportar o tráfego requerido, onde o fluxo sobre cada facilidade não pode ser maior que sua capacidade.

Gamvros, Raghavan e Golden (2002) apresentam um modelo de programação matemática para o PAGMCN que utiliza três tipos de variáveis. Seja  $g_{ij}$  igual a 1 se uma facilidade é instalada sobre o arco  $(i, j)$  e 0 caso contrário. Seja  $y_{ij}^l$  igual a 1 se a facilidade do tipo  $l$  é instalada sobre o arco  $(i, j)$ , 0 caso contrário.

Nos modelos baseados em fluxo para o PAGMC, o fluxo vai do nó central em direção aos nós terminais. No modelo apresentado por Gamvros, Raghavan e Golden (2002), o fluxo deixa os nós terminais em direção ao nó central. Cada nó terminal possui um produto que deve ser transportado ao nó central. A origem do produto  $k$  é o nó  $K$ . A terceira variável,  $f_{ij}^k$  indica o fluxo do produto  $k$  que passa pelo arco  $(i, j)$ . Sendo assim, o problema foi formulado da seguinte forma:

Minimizar

$$\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n \sum_{l=1}^L c_{ij}^l y_{ij}^l \quad (2.19)$$

Sujeito a:

$$\sum_{j=0}^n f_{ji}^i - \sum_{j=0}^n f_{ij}^i = -1 \quad i = 1, \dots, n; \quad (2.20)$$

$$\sum_{j=0}^n f_{j0}^k - \sum_{j=0}^n f_{0j}^k = 1 \quad k = 1, \dots, K; \quad (2.21)$$

$$\sum_{j=0}^n f_{ji}^k - \sum_{j=0}^n f_{ij}^k = 0 \quad i = 1, \dots, n; k = 1, \dots, K; i \neq k; \quad (2.22)$$

$$\sum_{k=1}^K f_{ij}^k \leq \sum_{l=1}^L Z_L y_{ij}^l \quad i = 0, \dots, n; j = 0, \dots, n; \quad (2.23)$$

$$\sum_{l=0}^L y_{ij}^l = g_{ij} \quad i = 0, \dots, n; j = 0, \dots, n; \quad (2.24)$$

$$f_{ij}^k \leq g_{ij} \quad i = 0, \dots, n; j = 0, \dots, n; k = 1, \dots, K \quad (2.25)$$

$$\sum_{j=0}^n g_{ij} = 1 \quad i = 1, \dots, n; \quad (2.26)$$

$$g_{ij} + g_{ji} \leq 1 \quad i = 0, \dots, n; j = 0, \dots, n; \quad (2.27)$$

$$g_{ij} \in \{0, 1\} \quad i = 0, \dots, n; j = 0, \dots, n; \quad (2.28)$$

$$y_{ij}^l \in \{0, 1\} \quad i = 0, \dots, n; j = 0, \dots, n; l = 1, \dots, L; \quad (2.29)$$

$$f_{ij}^k \geq 0 \quad i = 0, \dots, n; j = 0, \dots, n; k = 1, \dots, K. \quad (2.30)$$

O conjunto de restrições (2.20) a (2.22) e (2.25) a (2.28) garantem que a topologia da rede será uma árvore e que os arcos vão em direção ao nó central. A restrição (2.24) garante que somente um tipo de facilidade será instalada sobre um arco, e somente se este arco for utilizado na solução. Já a restrição (2.23) garante que o fluxo que passa por uma facilidade é menor que a sua capacidade.

## 2.9 Otimização por Colônia de Formigas

Geralmente, grupos sociais de insetos, mais especificamente colônias de formigas, representam sistemas distribuídos que, apesar da simplicidade dos seus indivíduos, apresentam um nível de organização social altamente estruturado. Devido a essa organização, as colônias de formigas podem realizar tarefas complexas que, em alguns casos, excedem as capacidades individuais de uma única formiga (DORIGO; BLUM, 2005).

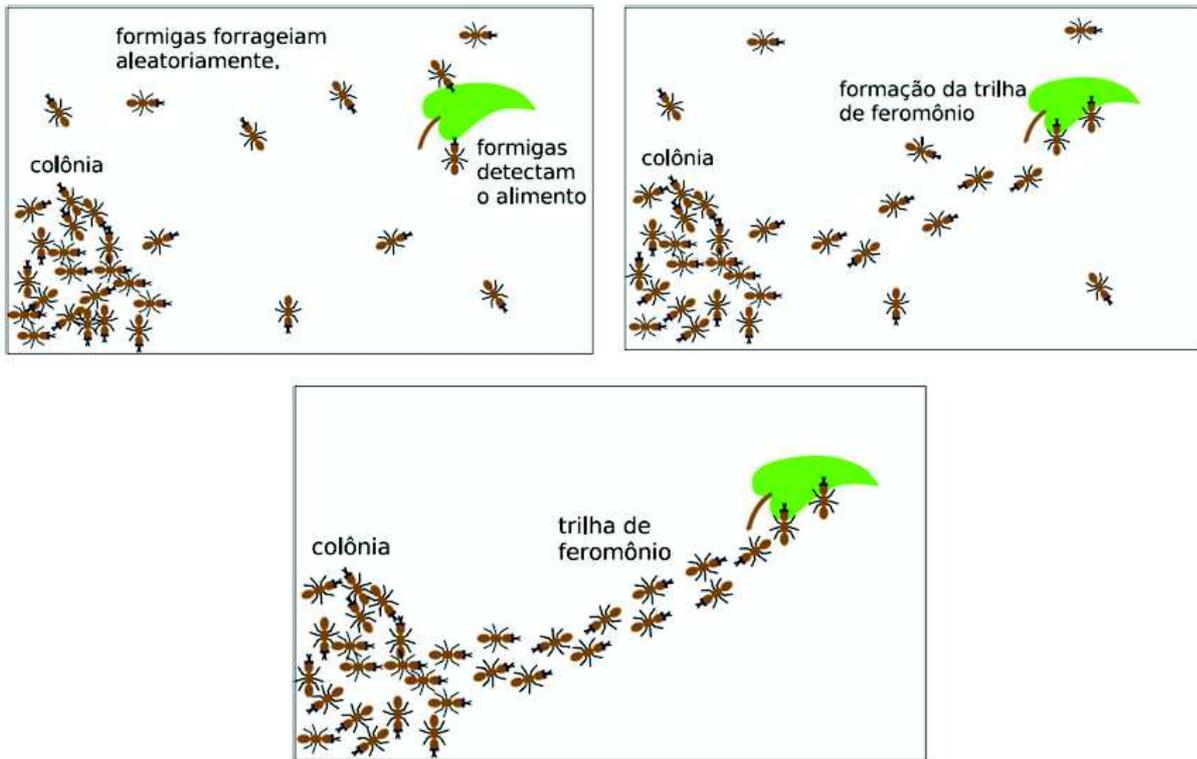
Diante disso, diversos algoritmos baseados em colônia de formigas foram desenvolvidos inspirados nestes comportamentos observados no mundo real. A ideia principal é que os princípios da auto-organização permitam o comportamento altamente coordenado entre as formigas reais. Esses princípios são explorados para coordenar as populações de agentes artificiais que colaboram para resolver problemas computacionais. No caso das formigas, a evidência física destes princípios é deixada por uma substância química chamada Feromônio que, em alta concentração, aumenta a probabilidade de outras formigas seguirem o mesmo caminho.

O funcionamento é simples: as formigas saem do ninho em busca do alimento seguindo direções aleatórias. Quando uma fonte de comida é encontrada, ela retorna ao ninho depositando feromônio no chão, gerando assim uma trilha entre o ninho e a fonte de comida. As outras formigas do ninho, ao sentir a substância no chão, tendem a seguir a mesma trilha de feromônio deixado pela formiga anterior e assim, também chegar à fonte de comida, como é evidenciado na Figura 16.

Diante deste contexto, Dorigo, Maniezzo e Coloni (1996) desenvolveram uma metaheurística baseada no comportamento das formigas chamada Otimização por Colônia de Formigas (do inglês, *Ant Colony Optimization* ou ACO). O algoritmo tenta reproduzir o comportamento das formigas no processo de busca da solução desde a escolha do caminho a ser seguido até o processo de atualização da trilha de feromônio.

A Otimização por Colônia de Formigas possui algumas características semelhantes e dife-

**Figura 16:** Exemplo da evolução do nível de feromônio em um caminho simples.

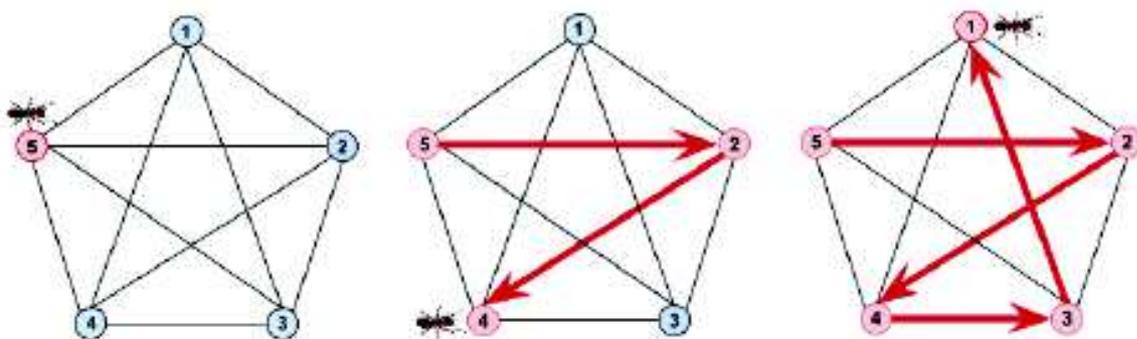


Fonte: Elaborado pelo autor

rentes com as formigas reais. Essas características podem ser vistas na Tabela 2.

No ACO, o problema é representado como um grafo  $G = (V, A)$  onde as formigas percorrem construindo a solução, passando pelos vértices e pelas arestas, depositando feromônio nas arestas. Na Figura 17, é possível ver a formiga construindo a sua solução percorrendo o grafo, partindo inicialmente do vértice 5 e chegando até o vértice 1, obtendo como solução o caminho 5-2-4-3-1.

**Figura 17:** Exemplo de construção de uma solução por uma formiga no algoritmo ACO



Fonte: Elaborado pelo autor

O algoritmo ACO pode ser descrito como na Figura 18. Desenvolvido por Dorigo, Maffei e Colnani (1996), o Ant System (AS), que entende-se, foi o primeiro algoritmo ACO

**Tabela 2:** Semelhanças e diferenças entre as formigas reais e o algoritmo ACO

<b>Características Semelhantes</b>	<b>Características Diferentes</b>
As formigas se movem de forma assíncrona e aleatória em busca das soluções	O mundo é discreto e as movimentações são transições entre os estados do ambiente
Decisão estocástica sobre o caminho a ser percorrido, baseado na informação local	A formiga possui um estado interno que representa a memória
Sequencia de movimentos locais entre os estados do ambiente	A atualização do feromônio é proporcional à qualidade da solução encontrada
Evaporação do feromônio (utilizado para buscar novas soluções)	A formiga possui algumas capacidades extras como, por exemplo, previsão da qualidade de estados futuros e otimização local

Fonte: Adaptado pelo autor de (DORIGO; BLUM, 2005)

implementado que foi aplicado no Problema do Caixeiro Viajante (Travelling Salesman Problem - TSP). Quando uma formiga  $k$  está no vértice  $i$  e vai para o vértice  $j$ , ela utiliza a seguinte regra de proporção pseudoaleatória definida como:

$$P_{ij}^k = \left\{ \frac{[\tau_{ij}]^\alpha \times [\eta_{ij}]^\beta}{\sum_{h \in N_i^k} [\tau_{ih}]^\alpha \times [\eta_{ih}]^\beta} \right. \quad (2.31)$$

onde:

- $P_{ij}^k$ : é a probabilidade que a formiga  $k$  tem de ir do vértice  $i$  para o vértice  $j$ ;
- $\tau_{ij}$ : é a quantidade de feromônio entre os vértices  $i$  e  $j$ ;
- $\eta_{ij}$ : é informação heurística entre os vértices  $i$  e  $j$ ;
- $\alpha$ : define a importância do feromônio na escolha do vértice;
- $\beta$ : define a importância da informação heurística na escolha do vértice;
- $N_i^k$ : é o conjunto de vértices disponível para a formiga  $k$  no vértice  $i$ .

Na Equação (2.31) é possível perceber que basta fazer  $\beta = 0$  para que a formiga leve em consideração somente o feromônio depositado na aresta para escolher o próximo vértice. Entretanto, fazendo  $\alpha = 0$ , a formiga irá levar em consideração somente a informação heurística entre os vértices.

Ao final do processo de construção das soluções por cada formiga, a quantidade de feromônio de todas as arestas é atualizada com operações de evaporação e depósito onde:

- **Evaporação** - Evita que o feromônio acumulado cresça indefinidamente além de permitir esquecer decisões ruins do passado.
- **Depósito** - Guia as outras formigas na escolha das suas soluções definindo o quão bom é seguir por cada aresta.

Figura 18: Algoritmo ACO

---

**Algoritmo 1: Algoritmo de Otimização por Colônia de Formiga**


---

```

início
  Atribua os valores dos parâmetros;
  Inicialize as trilhas de feromônios;
  enquanto não atingir o critério de parada faça
    para cada formiga faça
      Construa as Soluções;
    fim
    Aplique Busca Local (Opcional);
    Atualize o Feromônio;
  fim
fim

```

---

Fonte: Adaptado de Dorigo, Maniezzo e Colomi (1996)

As operações de depósito e evaporação do feromônio são realizadas utilizando a seguinte fórmula de atualização:

$$\tau_{ij} = (1 - \rho) * \tau_{ij} + \rho * \Delta\tau_{ij} \quad (2.32)$$

onde  $\rho$  é a taxa de atualização do feromônio e  $\Delta\tau_{ij}$  representa a quantidade de feromônio que será depositado na aresta entre os vértices  $i$  e  $j$ . Esse valor vai depender do problema que está sendo resolvido.

### 3 TRABALHOS RELACIONADOS

Este capítulo analisa trabalhos relacionados a projetos de redes, que na literatura têm sido modelados e estudados como Problema de Planejamento de Redes (*Network Design Problem - NDP*). Levando em consideração pesquisas acadêmicas e projetos de instituições governamentais, a abordagem de técnicas para projetos de redes de comunicação pode ter diferentes objetivos, caracterizando o problema de diferentes formas.

#### 3.1 Localização de Facilidades (Redes sem fio) e Máxima Cobertura

O trabalho apresentado por Chiu e Lin (2004) consiste na implementação de um algoritmo de otimização, baseado na metaheurística *Simulated Annealing*, para solucionar um problema de otimização de alocação de sensores sem fio com limitação de custos de alocação e máxima cobertura. Adotaram um cenário baseado em rede que permite a instalação de no máximo um sensor em cada ponto da rede. Cada sensor é limitado por um raio de cobertura conhecido e deve alcançar, no mínimo, o raio de cobertura definido por outro sensor para que a rede se forme. Neste trabalho, definiram a distância Euclidiana como entrada do problema. No início da busca, eles sugerem que exista um sensor implantado em cada ponto da rede. Cada iteração do algoritmo de otimização tenta reduzir um sensor ou modificar a localização de um sensor da rede de forma aleatória, e aceita a solução se as restrições forem satisfeitas. O algoritmo é interrompido se a temperatura mínima for atingida e ou se a cobertura completa é alcançada. Puderam concluir a eficiência do algoritmo comparando instâncias menores de soluções conhecidas com algoritmos exatos. Concluíram que seu algoritmo pode produzir soluções desejadas para as redes, no entanto não é garantido que a solução apresentada seja ótima.

Um algoritmo GRASP (*Greedy Randomized Adaptive Search Procedure*) é sugerido por Arroyo (2006) para resolver um problema de alocação de antenas de transmissão, que tem por objetivo cobrir a maior quantidade de pontos de demanda usando um número mínimo de antenas. Os autores tratam o tema como um problema de localização de máxima cobertura, sendo os recursos justamente modelados como antenas de transmissão e recepção. O objetivo é maximizar o número de clientes atendidos, minimizando o número de antenas a serem usadas.

No trabalho de Martins (2013), são tratados os sistemas centralizados de medição de energia que compõem as chamadas *Smart Grids*, redes inteligentes de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica. O autor descreve o desenvolvimento de uma solução computacional, baseada na metaheurística *Simulated Annealing*, para apoio à formulação de projetos de redes otimizadas de infraestruturas avançadas de medição, que utilizam equipamentos de sistemas de medição centralizados em uma rede de distribuição de energia elétrica, garantindo máxima cobertura da rede. Os resultados obtidos na formação de topologias de redes de comunicação para sistemas de medição centralizada, bem como otimização na utilização de equipamentos, garantiram a redução de custos na instalação da rede.

### 3.2 Recomposição de redes

Os autores Watcharasitthiwat e Wardkein (2009) propõem a solução do problema de projeto de redes, que envolve a seleção de subconjuntos de enlaces ou uma nova topologia de rede para minimizar o custo de recomposição da rede em caso de falha. O trabalho propõe um algoritmo com base na Otimização por Colônia de Formigas, que introduz duas técnicas de adição, a fim de melhorar o processo de pesquisa, ou seja, o processo de busca de vizinhança e reinicialização. Para demonstrar a eficiência do algoritmo, ele foi testado em três diferentes topologias de rede e os resultados comparados com os obtidos com algoritmos genéticos e busca tabu. Os resultados da simulação demonstraram que a abordagem proposta é superior aos algoritmos convencionais.

Barreto (2011) faz um estudo sobre a recomposição de redes de telecomunicações utilizando metaheurísticas baseadas em algoritmos genéticos e algoritmo de Dijkstra, utilizando ainda o conceito de redes fictícias, aplicado ao problema do planejamento de redes de telecomunicações referente às redes de transporte. Em seu trabalho, ele sugere a utilização de um algoritmo do caminho mais curto, ou *shortest path*, como estratégia para recomposição e planejamento de redes de telecomunicações. A utilização do algoritmo de Dijkstra foi adotada por ser uma solução na busca do caminho mais curto em grafos. Nesta estratégia, cada nó é explorado e associado a um custo. Sempre o nó de menor custo total até o momento é selecionado para continuar a exploração. O objetivo da obtenção do caminho mais curto é a capacidade de medir o comprimento do caminho através da aplicação de métricas como distâncias geográficas, custos operacionais, priorizações, entre outros.

### 3.3 Problema de planejamento de rede

O problema de planejamento de redes ópticas é abordado por Varvarigos e Christodoulopoulos (2014), onde é feita uma breve introdução de algoritmos e técnicas para resolver o problema de otimização de rede. A ênfase dada no trabalho é concentrada em redes WDM no que se refere a roteamento e atribuição de comprimentos de onda, alocação de roteamento e de espectro e planejamento estático. Para isso, são utilizadas heurísticas e programação linear inteira (PLI).

A pesquisa de Silva (2012) apresenta um algoritmo capaz de encontrar uma solução ótima para o planejamento de infraestrutura de redes multiníveis, tendo como objetivo trabalhar com vários níveis interativamente, considerando o impacto dos resultados de cada nível nos níveis adjacentes. Uma infraestrutura de telecomunicações, baseada em fibras ópticas, é utilizada como um estudo de caso, utilizando bases de dados georreferenciadas. Os resultados obtidos com o algoritmo foram satisfatórios, com uma redução de custo de até 40% sobre o método tradicional utilizado nas comparações.

O problema de planejamento de redes de acesso é tratado por Chamberland (2009) com um modelo de programação matemática que é resolvido usando uma implementação comercial do algoritmo *branch-and-bound*. Também é apresentado um exemplo de planejamento deta-

lhado de redes de acesso, juntamente com experiências destinadas a avaliar o desempenho da abordagem proposta.

O problema de localização de concentradores é abordado por Almeida (2009) e propõe métodos heurísticos que utilizam a busca por agrupamentos, uma técnica de intensificação de busca capaz de identificar regiões do espaço de busca mais promissoras para a obtenção de soluções. Dois algoritmos são propostos: um algoritmo genético (AG) e um algoritmo *simulated annealing* com lista tabu. De acordo com os testes computacionais realizados com os algoritmos propostos, e com estes combinados com a busca por agrupamentos (*clustering search*), os testes demonstraram que a aplicação da busca por agrupamentos a estes algoritmos permite obter soluções de melhor qualidade e em menor tempo computacional, em relação às soluções obtidas pelos algoritmos isoladamente.

Na dissertação de Mestrado de Livramento (2004), foi desenvolvido um algoritmo genético para resolver problemas no projeto de redes de telecomunicações cabeadas. A autora propôs o particionamento de grandes áreas em pequenas seções controladas por um único equipamento. Utiliza conceitos de grafos de vizinhança para a instalação de equipamentos de serviços de telecomunicações geograficamente referenciados em postes públicos. Seu algoritmo, testado com dados reais em plantas de telecomunicações de grandes áreas urbanas, obteve bons desempenhos, distribuindo uniformemente os equipamentos conforme as demandas e minimizando custos estimados de materiais de construção aplicados às redes de telefonia cabeada na região teste.

### 3.4 Árvore Geradora Mínima

No trabalho de Monteiro, Fontes e Fontes (2015) é abordado o problema da árvore geradora mínima com restrição mínima para passagem por outros nós até a unidade central da rede. Para a solução do problema é proposta uma heurística híbrida baseada na otimização por Colônia de Formigas e em busca local. É resolvido um conjunto de problemas conhecidos e comparados os resultados obtidos com os relatados na literatura. O algoritmo provou ser capaz de encontrar uma solução ótima em mais de 75% das redes, para cada instância do problema resolvida.

O problema da árvore geradora mínima capacitada é abordado por Pappas et al. (2014), onde são vistas três heurísticas modificadas a partir do trabalho de Gamvros, Raghavan e Golden (2002) baseadas em programação linear inteira, para lidar com o problema das demandas de tráfego não unitárias. Das três heurísticas implementadas, somente uma obteve uma solução ótima aproximada para o problema da árvore geradora mínima capacitada.

Resende (2012) apresenta um tutorial sobre a metaheurística de algoritmo genético com chave aleatória tendenciosa para resolução de problemas de otimização combinatória com ênfase em telecomunicações. São apresentados os conceitos básicos do algoritmo genético com chave aleatória tendenciosa, para utilização em problemas de concepção de redes IP de sobrevivência, localização do servidor redundante para distribuição de conteúdo, localização de

regenerador em redes ópticas e de roteamento e atribuição de comprimento de onda em redes ópticas.

O trabalho apresentado por Gamvros, Golden e Raghavan (2006) trata o problema da árvore geradora mínima capacitada em níveis em um artigo completo, onde é apresentada a formulação matemática do problema e o mesmo é solucionado de diversas formas: programação inteira, heurística, busca local e com algoritmo genético. Ao final, são comparados os resultados tendo sido obtidos os melhores resultados com o algoritmo genético.

### 3.5 Considerações Finais do Capítulo

Este capítulo apresentou importantes trabalhos relacionados a localização de facilidades (redes sem fio) e máxima cobertura, recomposição de redes, problema de planejamento de rede e árvore geradora mínima. Os trabalhos foram compilados e apresentados na Tabela 3.

**Tabela 3:** Comparativo trabalhos relacionados

Trabalho	Localização de Facilidades	Máxima Cobertura	Redes de Fibra		Árvore Geradora Mínima	Cidades Inteligentes
			Óptica	Redes Sem Fio		
Chiu e Lin (2004)	x	x		x		
Arroyo (2006)	x	x		x		
Martins (2013)	x	x		x		
Varvarigos (2014)	x		x			
Silva (2012)	x		x			
Chamberland (2009)	x		x			
Almeida (2009)	x		x			
Livramento (2004)	x		x			
Monteiro (2015)	x				x	
Pappas (2014)	x				x	
Resende (2012)	x		x		x	
Gamvros (2006)	x		x		x	

Fonte: Elaborado pelo autor.

Como visto na tabela o problema de localização de facilidades aparece tanto relacionado para redes de fibra óptica quanto para redes sem fio, enquanto o problema de máxima cobertura está vinculado somente a redes sem fio. Já o problema da árvore geradora mínima está vinculado tanto ao problema de localização de facilidades quanto a de redes de fibra óptica. Assim vislumbrou-se como oportunidade de pesquisa englobar os problemas de localização de facilidades e máxima cobertura para projetar redes de acesso híbridas (ópticas e sem fio) para cidades inteligentes, que não apareceram em nenhum trabalho relacionado.

## 4 PROBLEMA ALVO E METODOLOGIA PROPOSTA

Neste capítulo, 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*). Porém, como está sendo tratado o projeto de redes híbridas (ópticas e sem fio), há um novo elemento que é o problema do recobrimento (máxima cobertura) da rede sem fio. Assim, existem dois problemas para serem solucionados de forma integrada e alguns pontos precisam ser observados:

- Quantidade de clientes a serem atendidos (nós de demanda) da rede óptica e sem fio;
- Quantidade de níveis de rede;
- Quantidade e localização dos equipamentos em cada nível (nós facilitadores);
- O caminho entre os nós considerando a área geográfica;
- A flexibilidade da rede em atender novas demandas;
- A área de cobertura da rede sem fio.

### 4.1 Problema Alvo

Com o crescimento da demanda do tráfego impulsionado pela universalização dos serviços onipresentes em dispositivos móveis, se torna cada vez maior a necessidade de implantação das redes de acesso de telecomunicações híbridas, principalmente no que tange à implantação dos conceitos de cidades inteligentes, onde sensores devem estar estrategicamente distribuídos para a coleta de informações, a fim de abastecer com dados as aplicações disponíveis aos gestores e cidadãos.

Em muitas cidades já existem redes de fibras ópticas ou até mesmo redes sem fio, mas que ainda não conseguem ter a máxima cobertura para disponibilizar os serviços de uma cidade inteligente. Partindo do pressuposto que cada cidade já possui demandas como, por exemplo: disponibilizar rede de comunicação de dados para Escolas, Postos de Saúde e demais órgãos do município, estes pontos são tomados como base para o início da solução do problema de recobrimento, que após a sua execução poderá necessitar de novos pontos que deverão ser atendidos pela rede de fibra óptica.

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 híbridas (ópticas e sem fio), através de métodos computacionais.

## 4.2 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.

### 4.2.1 Modelagem Matemática do Problema do Recobrimento Aplicada neste Trabalho

Esta seção apresenta a formulação matemática que representa o problema do recobrimento para verificar a máxima cobertura da rede sem fio para a cidade inteligente. Cabe ressaltar que as restrições utilizadas neste trabalho podem ser ajustadas de acordo com os tipos de tecnologias de rádio utilizada, pois isto determina diretamente o resultado para definição da área de cobertura e capacidade da rede sem fio. Desta forma, essas restrições são tratadas de forma genérica.

A modelagem matemática para o Problema do Recobrimento se apresenta da seguinte forma:

Minimizar

$$z = \sum_{i=1}^n c_i x_i; \quad x_i = \{0, 1\}; \quad (4.1)$$

Sujeito a:

$$u_i = \sum_{i=1}^n d_{ij} x_i \geq 1; \quad j = 0, 1, \dots, n; \quad x_i = \{0, 1\}; \quad (4.2)$$

$$M_k = 1; \quad k = 1, \dots, n; \quad (4.3)$$

$$DSF_{ki} \leq DR; \quad i, k = 0, 1, \dots, n; \quad DR \in \mathbb{R}_+^*; \quad (4.4)$$

$$DFO_{ij} \geq DG; \quad i, j = 0, 1, \dots, n; \quad DG \in \mathbb{R}_+^*; \quad (4.5)$$

Sendo:

- $c_i$ : representa o custo associado à instalação de um elemento da rede (ponto de acesso PARFORSF);
- $x_i$ : representa se o elemento da rede foi instalado ou não;
- $u_i$ : é o resultado do somatório de uma linha da matriz de adjacências de instalação dos pontos de acesso PARFORSF;
- $d_{ij}$ : representa um ponto de acesso PARFORSF na matriz de adjacências.

- $M_k$ : representa o atendimento a um roteador (PARSF)  $k$ ;
- $DSF_{ki}$ : distância entre um roteador (PARSF) e um ponto de acesso PARFORSF;
- $DR$ : distância euclidiana máxima aceitável entre um roteador (PARSF) e o ponto de acesso PARFORSF;
- $DFO_{ij}$ : distância entre pontos de acesso PARFORSF;
- $DG$ : distância euclidiana máxima aceitável entre pontos de acesso PARFORSF.

Para garantir a cobertura da rede, a restrição (4.2) foi modelada para garantia do atendimento à restrição de que um ponto de acesso PARFORSF deve manter comunicação com pelo menos um outro ponto de acesso PARFORSF. Esta restrição assegura que cada ponto de acesso PARFORSF (*gateway mesh*) esteja conectado a pelo menos a um dos outros pontos de acesso PARFORSF, formando uma rede de comunicação redundante no caso de rompimento da rede de fibra óptica.

A restrição (4.3) define que nenhum roteador (PARSF) *mesh* da área de cobertura poderá ficar sem conexão a um ponto de acesso PARFORSF.

Um outro dado importante é que o *gateway wireless* instalado no ponto de acesso PARFORSF tem uma área de abrangência máxima, em virtude do raio de transmissão dos sinais do rádio. A distância máxima admitida é expressa em metros, assumindo-se esta restrição como a distância euclidiana e apresentada na restrição (4.4).

Os rádios que ficarão instalados nos pontos de acesso PARFORSF, e a partir daí formarão a rede *mesh*, têm potência definida, e a possibilidade de sobreposição de células de rádio é prejudicial ao bom desempenho da rede *mesh*, desta forma temos a restrição (4.5) que define uma distância mínima entre pontos de acesso PARFORSF.

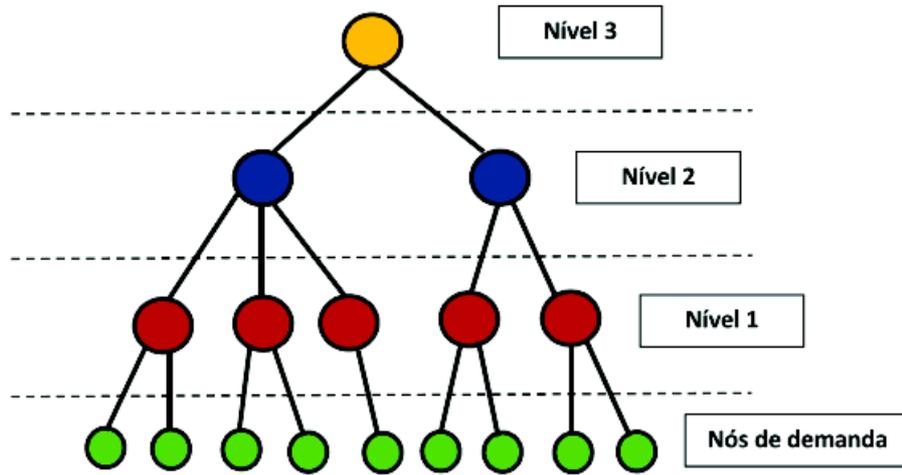
#### 4.2.2 Modelagem Matemática do PAGMCN Aplicada neste Trabalho

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), mantendo um caminho único entre o nó central (OLT) até os nós clientes, como pode ser visualizado na Figura 19, levando em consideração algumas premissas que impactam no custo do projeto:

- A atenuação normal de uma fibra óptica é de -0,35 dB/km, a atenuação para cada emenda por fusão é de -0,15 dB/emenda;
- O comprimento máximo de um cabo é de 2.000 metros;
- O valor máximo de atenuação tolerado é de -28 dB;

- O número máximo de cisões é de 32;
- Todos os *splitters* de nível 2 com clientes conectados devem ser ligados a um *splitter* de nível 1.

**Figura 19:** Exemplificação dos níveis de uma rede com três níveis.



Fonte: Elaborado pelo autor.

O modelo de otimização é dado por:

Minimizar:

$$\begin{aligned}
 & \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{ss} X_{ij} \left[ C_c D_{ij} + C_{fs} \left( \frac{D_{ij}}{2000} \right) \right] + \\
 & \quad + \sum_{j=1}^{ss} \sum_{k=1}^{sp} Y_{jk} \left[ C_c D_{jk} + C_{fs} \left( \frac{D_{jk}}{2000} \right) \right] + \\
 & \quad + \sum_{k=1}^{sp} Z_{kl} \left[ C_c D_{kl} + C_{fs} \left( \frac{D_{kl}}{2000} \right) \right] + \sum_{ts=1}^{sp+ss} C S_{ts} \quad (4.6)
 \end{aligned}$$

Sujeito a:

$$\sum_{j=1}^{ss} X_{ij} = 1, \quad i = 1, 2, \dots, m; \quad (4.7)$$

$$\sum_{i=1}^m X_{ij} \leq 16, \quad j = 1, 2, \dots, ss; \quad (4.8)$$

$$\sum_{j=1}^{ss} Y_{jk} \leq 16, \quad k = 1, 2, \dots, sp; \quad (4.9)$$

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{ss} X_{ij} Y_{jk} \leq 32, \quad k = 1, 2, \dots, sp; \quad (4.10)$$

$$\sum_{k=1}^{sp} Y_{jk} = \left\{ \begin{array}{l} 1, \quad \sum_{i=1}^m X_{ij} > 0, \\ 0, \quad \text{caso contrário} \end{array} \right\}, \quad j = 1, 2, \dots, ss; \quad (4.11)$$

$$CS_{ts} = \left\{ \begin{array}{l} 2328; \quad 0 < \sum_{j=1}^{ss} Y_{jk} \leq 2 \\ 2720; \quad 2 < \sum_{j=1}^{ss} Y_{jk} \leq 4 \\ 3504; \quad 4 < \sum_{j=1}^{ss} Y_{jk} \leq 8 \\ 4615; \quad 8 < \sum_{j=1}^{ss} Y_{jk} \leq 16 \end{array} \right\}, \quad ts = 1, 2, \dots, sp + ss; \quad (4.12)$$

$$\sum_{k=1}^{sp} \sum_{j=1}^{ss} X_{ij} Y_{jk} \left\{ \frac{0,35}{1000} (D_{ij} + D_{jk} + D_{kl}) + \frac{0,15}{2000} [(D_{ij} + D_{jk} + D_{kl})] + SA_{ta} \right\} \geq -28; \quad (4.13)$$

$$SA_{ta} = \left\{ \begin{array}{l} 5, 0; \quad 0 < \sum_{i=1}^m X_{ij} \leq 2 \\ 6, 8; \quad 2 < \sum_{i=1}^m X_{ij} \leq 4 \\ 10, 4; \quad 4 < \sum_{i=1}^m X_{ij} \leq 8 \\ 14, 0; \quad 8 < \sum_{i=1}^m X_{ij} \leq 16 \end{array} \right\}, \quad j = 1, 2, \dots, sp + ss. \quad (4.14)$$

Onde:

- $m$ : número de clientes;
- $ss$ : número de pontos de *splitters* secundários;
- $sp$ : número de pontos de *splitters* primários;
- $X_{ij}$ : conexão entre o cliente  $i$  e o *splitter* secundário;
- $Y_{jk}$ : conexão entre o *splitter* de nível secundário e o *splitter* de nível primário;
- $Z_{kl}$ : conexão entre o *splitter* de nível primário e a OLT (ponto central da rede);
- $C_c$ : custo do material e serviço de instalação por metro;
- $C_{fs}$ : custo por serviço de fusão;
- $CS_{ts}$ : custo total dos *splitters* utilizados;
- $SA_{ta}$ : custo de atenuação dos *splitters*;
- $D_{ij}$ : distância entre o cliente e o *splitter* de nível secundário;
- $D_{jk}$ : distância entre o *splitter* de nível secundário e o *splitter* de nível primário;
- $D_{kl}$ : distância entre o *splitter* de nível primário e a OLT (ponto central da rede).

A função objetivo representa o custo total da rede que consiste em cabos, emendas por fusão, cisões (*splitters*) e o custo do serviço de instalação. 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 número de emendas por fusão sobre um trecho pode ser determinado dividindo a distância entre dois pontos conectados pelo comprimento nominal do cabo. O valor monetário das variáveis associadas a custos estão armazenadas em matrizes auxiliares.

A restrição (4.7) define que cada cliente deve ser atribuído a somente um nó *splitter* secundário. A razão de separação do *splitter* permitida máxima é de 1:16. Portanto, as restrições (4.8) e (4.9), respectivamente, mostram que um *splitter* secundário pode atender no máximo 16 clientes e o *splitter* primário pode suportar no máximo 16 *splitters* secundários. Como mostrado na restrição (4.10) é considerado que o nível máximo de cisões deve ser 32.

A restrição (4.11) mostra que todos os *splitters* secundários com clientes atribuídos devem ser conectados a um *splitter* primário. O custo das cisões depende do tipo de *splitter* utilizado em cada nível e um depende do outro. O custo das cisões é coletado pela variável  $CS_k$ , que é verificado na restrição (4.12).

Todas as conexões entre os clientes finais até o ponto central da rede devem estar dentro do limite de atenuação do sistema. As fontes de atenuação são medidas no comprimento do cabo entre cada nível da rede, pelo número de emendas e divisores ópticos. Assim, o custo total da atenuação de uma conexão, incluindo todas as perdas de sinal e atenuação de segurança, são mostradas na restrição (4.13). É considerado que a atenuação total pode ser igual ou menor que 28 dB. Na restrição (4.14) são mostrados os níveis de atenuação para cada tipo de *splitter*.

### 4.2.3 Metodologia de Condução dos Experimentos

Com objetivo de explorar a complexidade de projetar uma rede híbrida (óptica e sem fio), é apresentado na Figura 20 um fluxograma em alto nível para a composição das estratégias que são utilizadas no desenvolvimento da solução do problema.

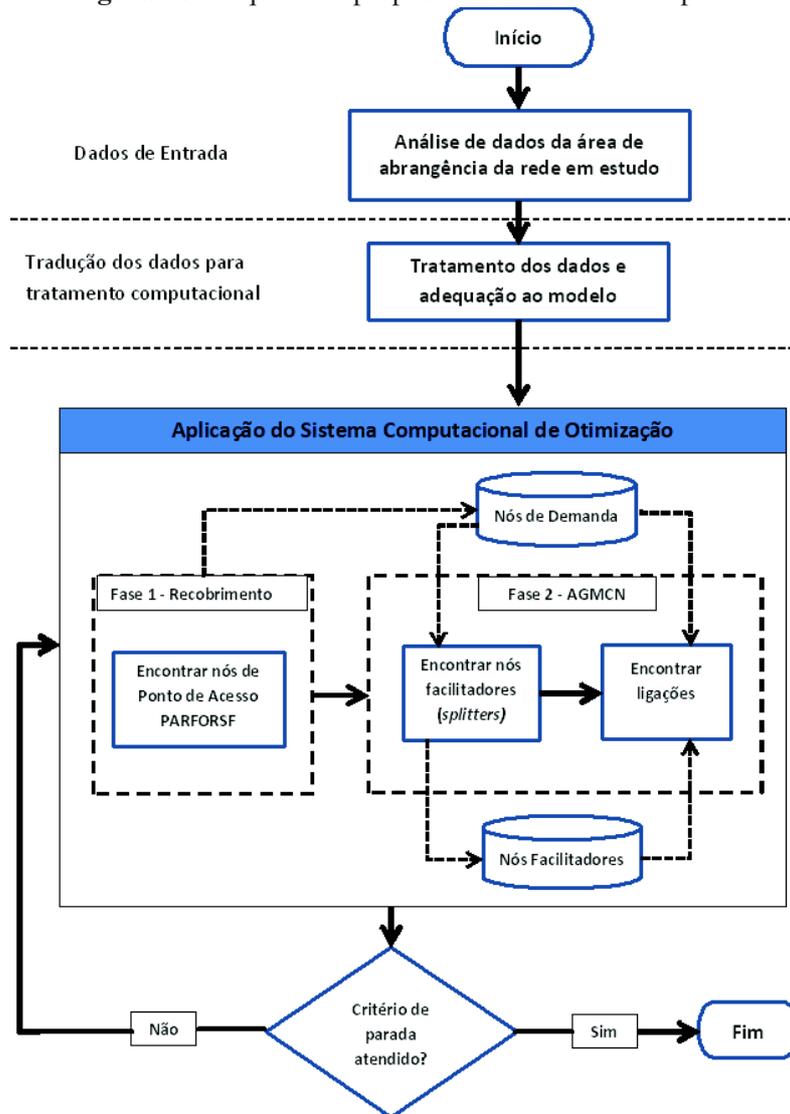
O algoritmo selecionado para a estratégia de otimização do problema é uma busca metaheurística que imita os procedimentos de uma colônia de formigas (ver Seção 2.9). A estratégia adotada neste trabalho inicia com a análise dos dados da área de abrangência do projeto, para então, numa primeira fase, resolver o problema do recobrimento que fornece subsídios para, numa segunda fase, realizar a otimização da rede, encontrando a solução final.

A seguir, são descritas as etapas definidas no fluxograma:

**Dados de Entrada:** análise de dados da área de abrangência da rede em estudo.

- Ocorre a realização do levantamento das variáveis do projeto, dos dados responsáveis pela localização dos pontos ou nós a serem analisados, identificados em coordenadas cartesianas.
- Definir os valores de entrada para a Fase 1 como:

**Figura 20:** Arquitetura proposta da ferramenta computacional



Fonte: Elaborado pelo autor

- Definir área de abrangência para o recobrimento;
- Definir os valores das variáveis de distâncias mínimas e máximas;
- Definir os valores de taxa de evaporação e atualização das formigas.
- Definir os valores de entrada para a Fase 2 como:
  - Definir a quantidade de níveis para a rede, o valor mínimo será 3;
  - Definir os valores de taxa de evaporação e atualização das formigas.

**Tradução dos dados para tratamento computacional:** tratamento dos dados e adequação ao modelo:

- Transformar coordenadas geográficas dos pontos;

- Verificar se existe a informação da distância entre todos os pontos até o nó central e a distância entre os pontos. Se necessário, calcular as distâncias ou pesos das arestas através das coordenadas geográficas.
- Montar a matriz de distâncias a partir da base de dados do problema. A matriz de distâncias contém as distâncias mínimas entre os pontos da rede e é criada através da utilização do algoritmo Floyd-Warshall (FLOYD, 1962), pois apresenta excelente desempenho e possui uma implementação bastante simples. O propósito da montagem da matriz de distâncias já no início da solução é de evitar a necessidade de executar rotinas de obtenção de caminho mínimo na rotina de avaliação do algoritmo de colônia de formigas, bem como armazenar os caminhos mínimos entre os pares de pontos.

**Aplicação do Sistema Computacional de Otimização:** Esta etapa é dividida em fases:

**Fase 1:** Encontrar nós de ponto de acesso - PARFORSF. Verificar se há necessidade de adição de mais pontos além daqueles já definidos para atendimento aos requisitos das aplicações da cidade inteligente.

Estratégia:

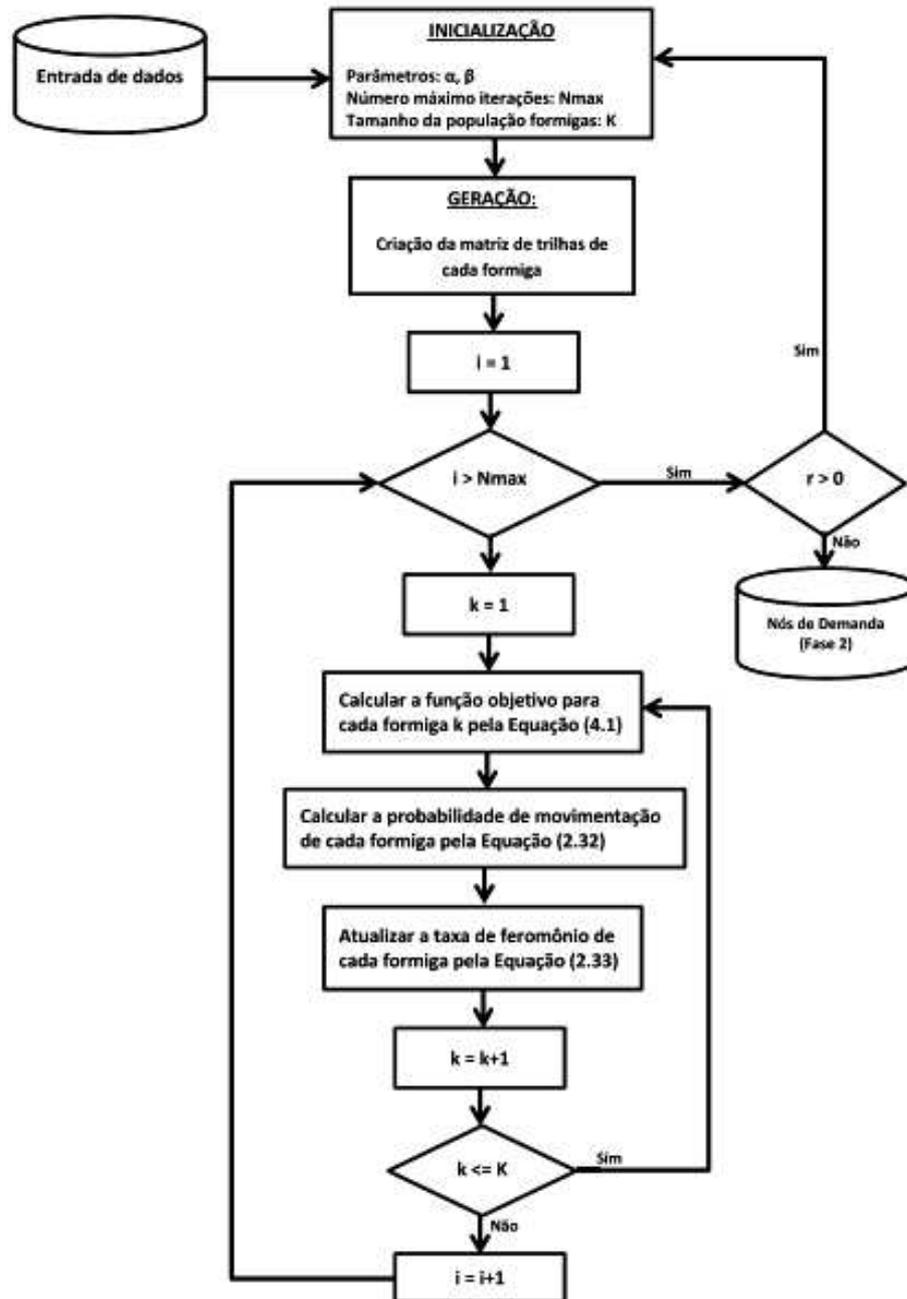
- De acordo com os valores informados nas variáveis de distâncias mínimas e máximas, é formado dentro da área de abrangência um reticulado de pontos (grade de pontos, cada um com sua coordenada geográfica), que representarão os roteadores que serão atendidos por um ponto PARFORSF, conforme as restrições da rede *mesh*;
- Caso ficarem roteadores *wireless* sem conexão com algum ponto PARFORSF, será adicionada à base de dados o novo ponto que atenda esta demanda.

Método computacional: foi utilizada a metaheurística colônia de formigas, com o propósito de obter a melhor localização dos *gateways* (pontos PARFORSF), tendo como base o algoritmo apresentado na Figura 18.

Conforme as premissas elencadas acima, inicialmente foi executado o algoritmo seguindo os passos conforme fluxograma da Figura 21.

O algoritmo inicia com a definição que todos os pontos são candidatos a serem pontos PARFORSF e que cada roteador é uma formiga que busca se conectar a um ponto PARFORSF que atenda as restrições do problema. Após a execução do algoritmo conforme o critério de parada estabelecido, os pontos (roteadores *wireless*) que não foram atendidos, serão definidos como novos nós de demanda PARFORSF para atender o recobrimento da rede *wireless mesh* e alimentar a entrada de nós de demanda para execução da segunda fase do sistema computacional de otimização.

Figura 21: Fluxograma do algoritmo ACO para o problema do recobrimento



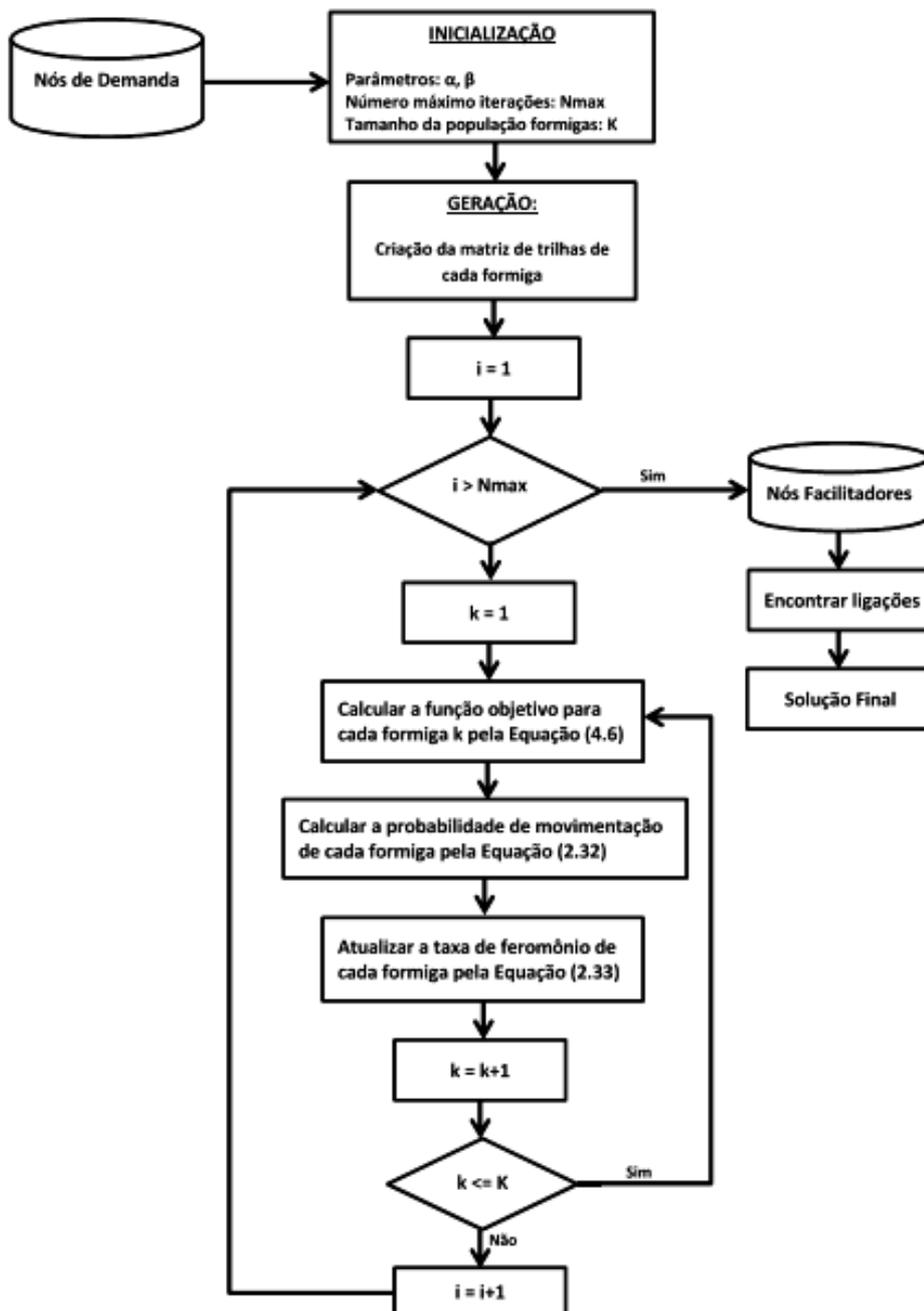
Fonte: Elaborado pelo autor

**Fase 2:** Encontrar a AGMCN com o objetivo de minimizar o custo total de construção da rede, determinando a melhor localização dos *splitters*, tipos de fibras para atender as demandas de capacidade dos pontos de acesso, respeitando as restrições:

- O nó central da rede é definido através da localização da OLT;
- Um cliente pode representar vários assinantes num mesmo local, a demanda deste local será o somatório da demanda de todos os assinantes;

- O modelo para localização das facilidades (*splitters*) é formado por níveis:
  - Clientes para S2 (todos os clientes são conectados em *splitters* de nível secundário);
  - S2 para S1 (*splitters* de nível secundário conectados a *splitters* de nível primário);
  - S1 para OLT (*splitters* de nível primário conectados na OLT).
- A formação da AGMCN ocorre inicialmente com cada ponto tentando se conectar a outro ponto mais próximo, formando um caminho mínimo até o ponto central;

**Figura 22:** Fluxograma do algoritmo ACO para o problema da árvore geradora mínima



**Definição do método computacional:** conforme mostrado na Figura 20, a Fase 2 é dividida em duas etapas que serão resolvidas com os seguintes métodos computacionais:

Encontrar nós facilitadores: foi utilizada a metaheurística colônia de formigas, com o propósito de obter a melhor localização das facilidades. Tendo como base o algoritmo apresentado na figura 18.

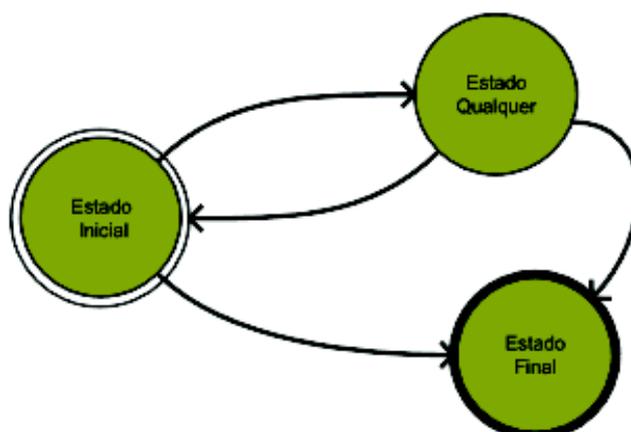
A proposta previu que o modelo para localização das facilidades *splitters* é formado por níveis conforme descrito no tópico anterior. Num primeiro momento, são processados os clientes (PAFORRSF) a serem atendidos obtendo a localização de um conjunto inicial de facilidades (*splitters*) nível 2 (S2). Posteriormente, são processadas as conexões das facilidades S2 para S1 (*splitters* de nível secundário conectados em *splitters* de nível primário) e, por último, as conexões das facilidades S1 para OLT (*splitters* de nível primário conectados na OLT) de acordo com o fluxograma apresentado na Figura 22.

Encontrar ligações: será realizada através de consulta da matriz de adjacências que armazena todas as distâncias de menor caminho entre todos os pontos envolvidos na solução.

#### 4.2.4 Detalhamento do Sistema Computacional

O sistema computacional desenvolvido é dividido em etapas, onde cada etapa representa um autômato finito determinístico. Cada etapa pode ser identificada como um "estado do sistema", responsável por resolver um pequeno problema. Os estados do sistema têm algumas distinções, como estado de início, estado qualquer, estado final, além de uma regra de transição, como ilustra a Figura 23.

**Figura 23:** Representação gráfica dos estados de um autômato

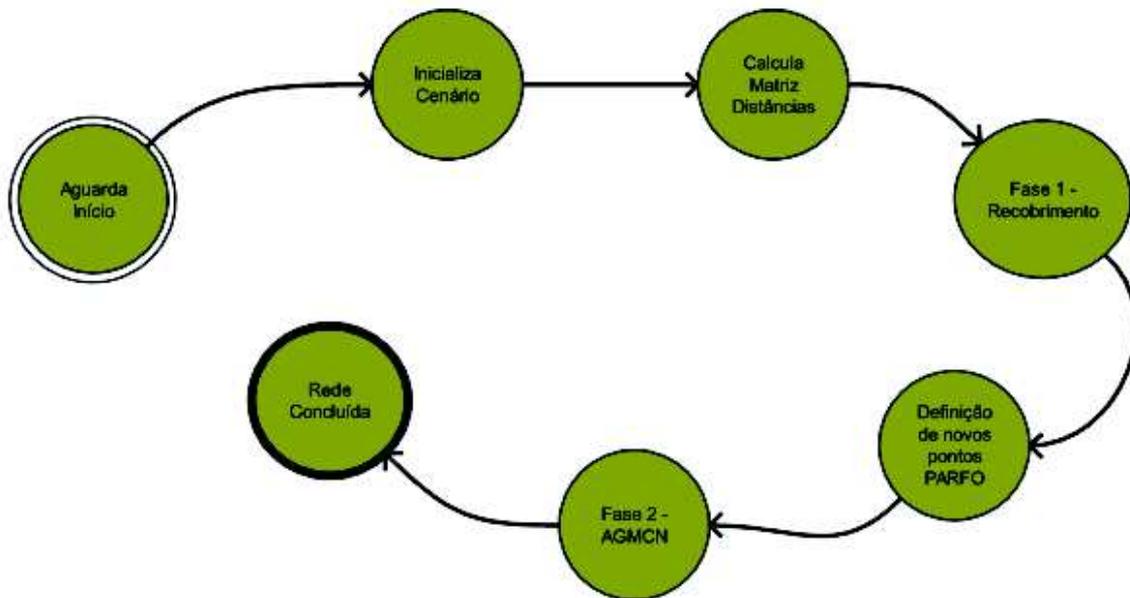


Fonte: Elaborado pelo autor

A aplicação do sistema computacional está subdividido em estados distintos como representado na Figura 24.

1. **Aguarda início:** este estado interage com o usuário, aguardando a configuração de vários

**Figura 24:** Autômato representando a aplicação do sistema computacional



Fonte: Elaborado pelo autor

parâmetros do sistema, como arquivos de entrada, distâncias limites, define a área de abrangência da rede, além de um comando para início do processamento;

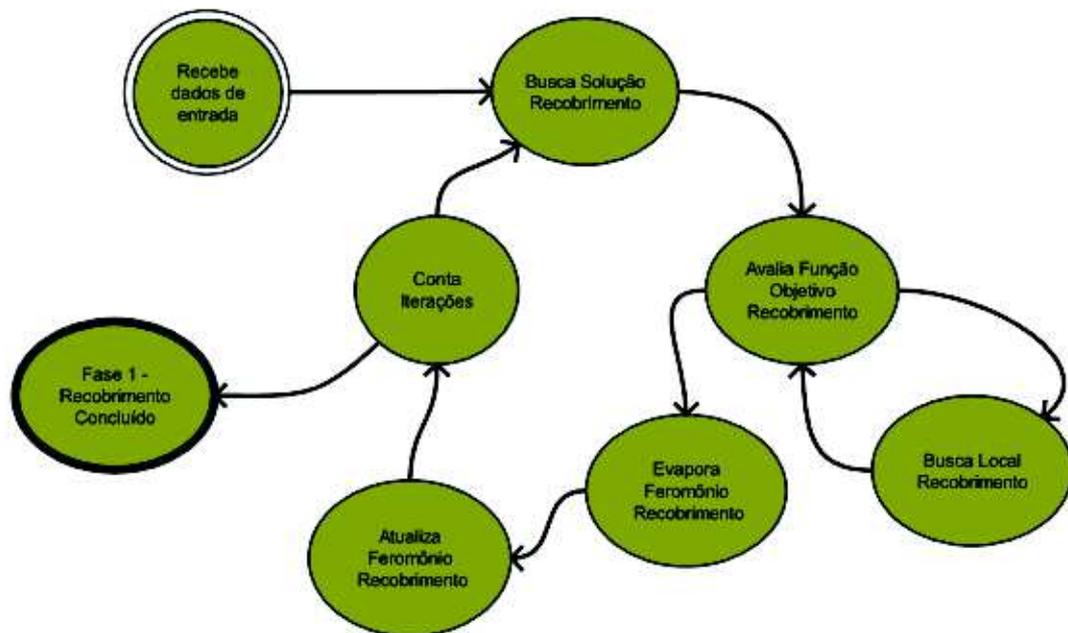
2. **Inicializa Cenário:** recebe e processa informações de arquivos de parâmetros como:
  - (a) Arquivo de Pontos PARFO: contendo a localização de todos os pontos aptos a serem conectados com a rede de fibra óptica e também candidatos a serem *gateways* da rede, referenciados em um plano cartesiano;
  - (b) Gerar Pontos PARSF: executa rotina que verifica a dimensão da área em estudo e cria um reticulado de pontos que deverão ser atendidos por um ponto PARFO da rede.
3. **Calcula matriz de distâncias:** este estado cria a matriz, que representa as distâncias entre todos os pontos PARFO (distâncias  $\alpha_{ij}$ ) e entre todos os pontos clientes PARSF e todos os pontos PARFO (distâncias  $\beta_{ki}$ );
4. **Calcula solução - Fase 1 - Recobrimento:** realiza o atendimento a todos os clientes PARSF calculando a função objetivo e respeitando as restrições, a ser detalhado no subitem 4.2.4.1.
5. **Definição de novos pontos PARFO:** caso na etapa anterior algum roteador *wireless* (PARSF) não tenha sido atendido por algum ponto PARFO, então este local será definido como uma nova demanda para ser conectado com a rede de fibra óptica na Fase 2.

6. **Calcula solução - Fase 2 - AGMCN:** realiza o atendimento a todos os pontos PAR-FORSF calculando a função objetivo e respeitando as restrições, a ser detalhado no subitem 4.2.4.4.
7. **Rede concluída:** de acordo com o critério de parada do sistema estabelecido, a rede é concluída.

#### 4.2.4.1 Fase 1 - Recobrimento

A Fase 1 do Recobrimento é representada pelo autômato finito determinístico da Figura 25. Seus estados representam as etapas de formação do resultado, resolvendo problemas menores a cada iteração:

**Figura 25:** Autômato representando a Fase 1 - Recobrimento



Fonte: Elaborado pelo autor

1. **Recebe dados de entrada:** recebe os dados de todos os pontos para processamento.
2. **Busca Solução Recobrimento:** a ser detalhado no subitem 4.2.4.2.
3. **Avalia Função Objetivo Recobrimento:** neste estado é calculado o custo de cada solução e avaliado se a solução atual melhorou o resultado em relação ao resultado da melhor solução, o que gera indicativo de como atualizar o feromônio.
4. **Busca Local Recobrimento:** a ser detalhado no subitem 4.2.4.3.

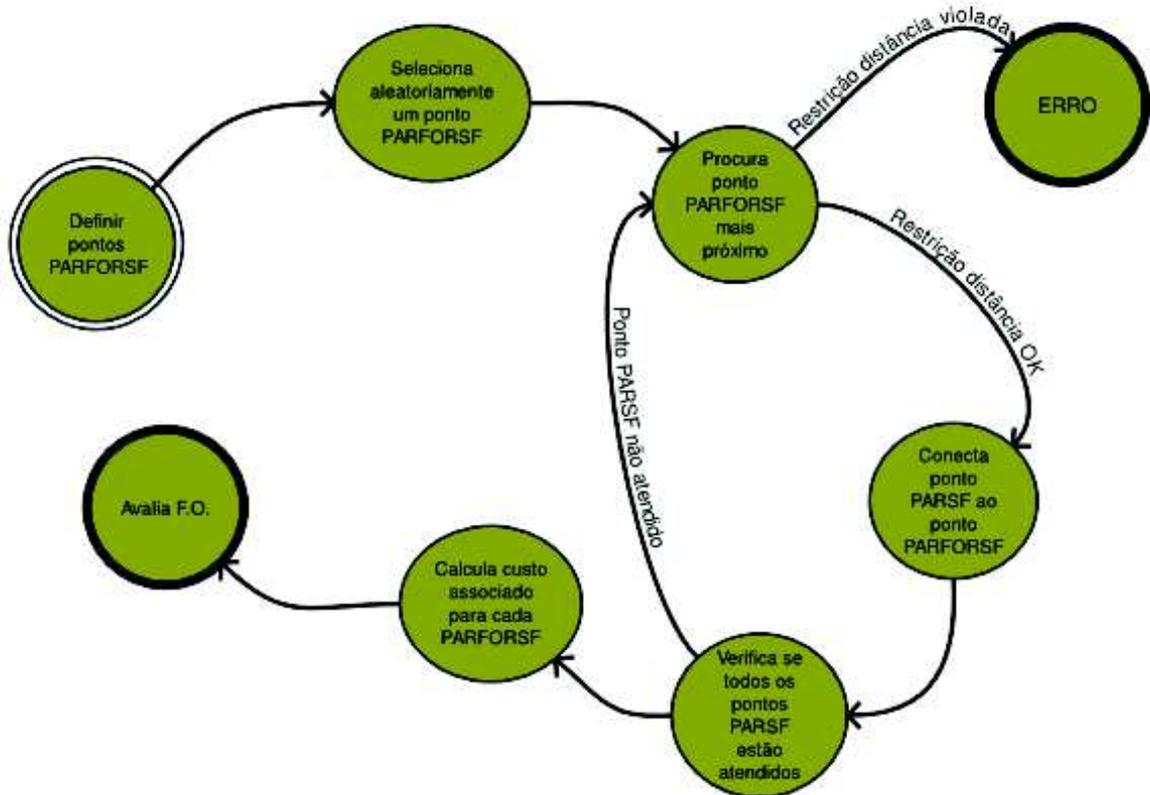
5. **Evapora Feromônio Recobrimento:** todos os pontos indistintamente têm seu valor de feromônio evaporado conforme a taxa de evaporação definida.
6. **Atualiza Feromônio Recobrimento:** somente os pontos envolvidos, quando houver melhora no resultado da melhor solução têm seu valor de feromônio atualizado conforme a taxa de atualização definida.
7. **Conta Iterações:** este estado controla o número de iterações que serão executadas, que determina o critério de parada do programa.
8. **Fase 1 - Recobrimento Concluído:** é o estado final deste autômato onde são armazenados e apresentados os resultados da melhor solução encontrada.

#### 4.2.4.2 Fase 1 - Recobrimento: Busca Solução

A solução é representada pelo autômato finito determinístico da Figura 26. Seus estados representam as etapas de formação do resultado, resolvendo problemas menores a cada iteração:

1. **Definir pontos PARFORSF:** todos os pontos da solução são considerados como candidatos a serem pontos PARFORSF (pontos com fibra óptica e sem fio).
2. **Seleciona aleatoriamente um ponto PARFORSF:** cada ponto PARFORSF seleciona aleatoriamente um ponto PARFORSF não podendo ser o próprio.
3. **Procura ponto PARFORSF mais próximo:** verifica se o ponto PARFORSF selecionado atende à restrição de distância máxima (este valor é definido no estado de Aguarda Início), caso contrário retorna ao estado 2. Caso nenhum dos pontos PARFORSF selecionados atenderem a restrição de distância, segue para o estado de ERRO!
4. **Conecta ponto PARSF ao ponto PARFORSF:** realiza a associação do roteador PARSF ao ponto PARFORSF (ponto que será atendido pela rede de fibra óptica).
5. **Verifica se todos os pontos PARSF estão atendidos:** verifica a matriz de pontos PARSF, em busca de roteadores PARSF que ainda não estão associados a um ponto PARFORSF. No caso de ainda haver roteadores PARSF sem associação, retorna ao estado 3.
6. **Calcula custo associado para cada ponto PARFORSF:** calcula o custo associado de instalação, para cada ponto PARFORSF da rede, utilizado na solução.
7. **Avalia Função Objetivo:** calcula o custo total da implantação do sistema, através da equação da função objetivo (4.1).

**Figura 26:** Autômato representando a busca de soluções da fase do recobrimento



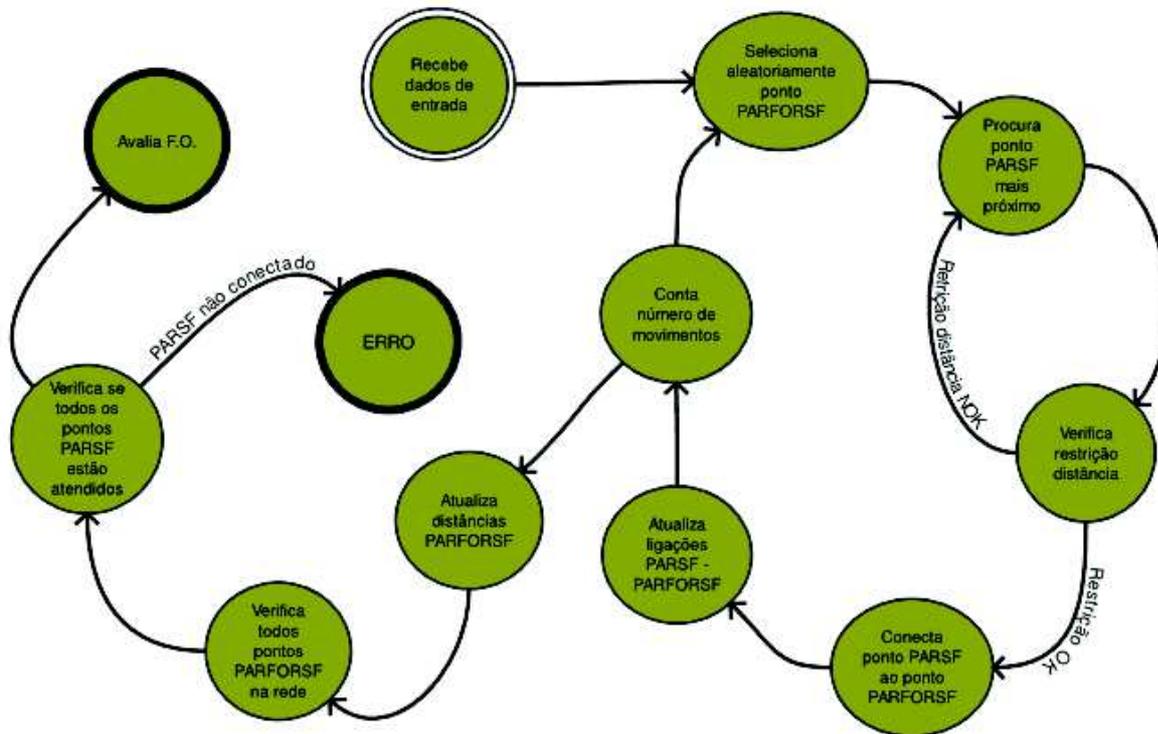
Fonte: Elaborado pelo autor

#### 4.2.4.3 Fase 1 - Recobrimento: Busca Local

O objetivo da aplicação da busca local é o de verificar, a partir de um ponto PARFORSF aleatório definido na solução inicial, se pode receber roteadores que estão dentro da sua área de recobrimento e melhorar a solução. Seus estados estão representados na Figura 27.

1. **Recebe dados de entrada:** recebe o resultado da solução inicial.
2. **Seleciona aleatoriamente ponto PARFORSF:** seleciona aleatoriamente um ponto PARFORSF dentre aqueles que foram definidos no estado Busca Solução.
3. **Procura ponto PARSF mais próximo:** verifica se existem pontos PARSF localizados próximos ao ponto PARFORSF selecionado e que não estejam conectados a ele.
4. **Verifica restrição de distância:** verifica se o ponto PARSF está localizado dentro do parâmetro de distância (definido no estado Aguarda Início) do ponto PARFORSF, caso contrário retorna ao estado 3. Se após atingir o critério de parada não encontrar um ponto PARSF que atenda à restrição, segue para ao estado 6.
5. **Conecta ponto PARSF ao ponto PARFORSF:** atendida a restrição da distância é realizada a associação do ponto PARSF ao novo ponto PARFORSF.

**Figura 27:** Autômato representando a aplicação de busca local da fase do recobrimento



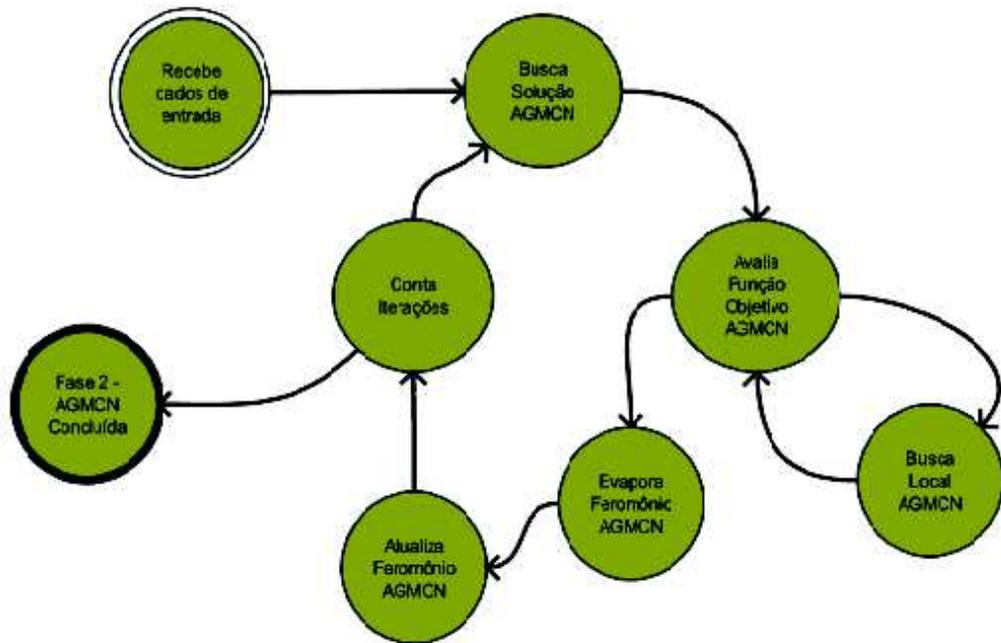
Fonte: Elaborado pelo autor

6. **Atualiza ligações PARSF - PARFORSF:** atualiza a matriz com a nova configuração da rede.
7. **Conta número de movimentos:** verifica se todos os movimentos configurados para a busca local foram executados, caso positivo segue para o estado 8, caso contrário retorna para o estado 2.
8. **Atualiza distâncias PARFORSF:** calcula as distâncias entre pontos PARFORSF selecionados na solução.
9. **Verifica todos pontos PARFORSF na rede:** verifica se todos os pontos PARFORSF selecionados na solução inicial possuem pontos PARSF associados. Se houver algum ponto PARFORSF sem mais nenhum ponto PARSF associado, o mesmo é retirado da solução.
10. **Verifica se todos os pontos PARSF estão atendidos:** verifica na matriz de pontos PARSF, em busca de roteadores PARSF que ainda não estão associados a um ponto PARFORSF. No caso de ainda haver cliente PARSF sem associação, retorna ao estado ERRO.
11. **Avalia Função Objetivo:** calcula custo total de implantação do sistema, através da equação (4.1).

#### 4.2.4.4 Fase 2 - AGMCN

A Fase 2 - AGMCN é representada pelo autômato finito determinístico da Figura 28. Seus estados representam as etapas de formação do resultado, resolvendo problemas menores a cada iteração:

**Figura 28:** Autômato representando a Fase 2 - AGMCN



Fonte: Elaborado pelo autor

1. **Recebe dados de entrada:** recebe os dados de todos os pontos para processamento.
2. **Busca Solução AGMCN:** será detalhado no subitem 4.2.4.5.
3. **Avalia Função Objetivo AGMCN:** neste estado é calculado o custo de cada solução e avaliado se a solução atual melhorou o resultado em relação ao resultado da melhor solução, o que gera indicativo para atualização do feromônio.
4. **Busca Local AGMCN:** será detalhado no subitem 4.2.4.6.
5. **Evapora Feromônio AGMCN:** todos os pontos indistintamente tem seu valor de feromônio evaporado conforme a taxa de evaporação definida.
6. **Atualiza Feromônio AGMCN:** somente os pontos envolvidos, quando houver melhora no resultado da melhor solução, têm seu valor de feromônio atualizado conforme a taxa de atualização definida.
7. **Conta Iterações:** este estado controla o número de iterações que serão executadas, que determina o critério de parada do programa.

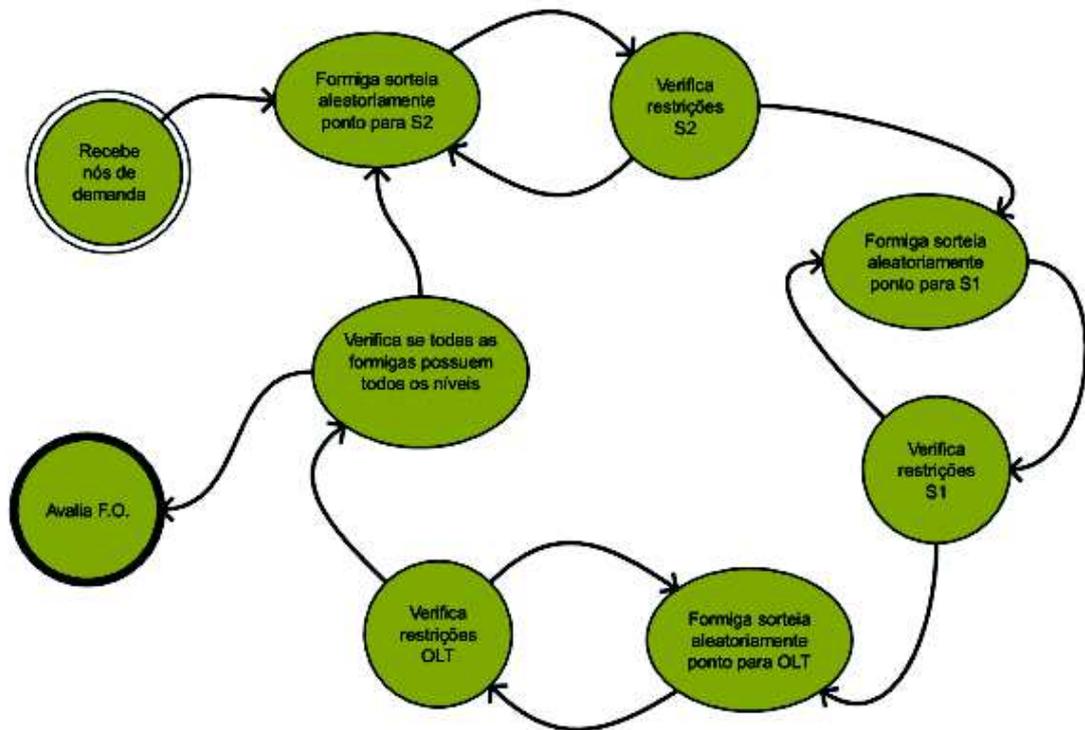
8. **Fase 2 - AGMCN Concluída:** é o estado final deste autômato onde são armazenados e apresentados os resultados da melhor solução encontrada.

#### 4.2.4.5 Fase 2 - AGMCN: Busca Solução

A solução inicial da Fase 2, que consiste na geração AGMCN - Árvore Geradora Mínima Capacitada em Níveis é representada pelo autômato finito determinístico da Figura 29. Seus estados representam as etapas de formação do resultado, resolvendo problemas menores a cada iteração:

1. **Recebe nós de demanda:** todos os nós de demanda são considerados clientes, aqueles já definidos como obrigatórios de receber a rede de fibra óptica, como também os pontos adicionais definidos na fase do recobrimento.
2. **Formiga sorteia aleatoriamente ponto para S2:** cada formiga sorteia aleatoriamente um ponto apto a receber este tipo de estrutura na rede, como sendo seu nível secundário da rede.
3. **Verifica restrições S2:** neste momento é verificada a restrição se o ponto definido como nível secundário já não excedeu sua capacidade total de conexões, caso positivo um novo ponto deverá ser sorteado retornando para o estado anterior.
4. **Formiga sorteia aleatoriamente ponto para S1:** cada formiga sorteia aleatoriamente um ponto apto a receber este tipo de estrutura na rede, como sendo seu nível primário da rede.
5. **Verifica restrições S1:** neste momento é verificada a restrição do limite de conexões possíveis para o nível primário, levando em consideração o número de conexões existentes no nível secundário, visando a atender as restrições de nível de atenuação da rede.
6. **Formiga sorteia aleatoriamente ponto para OLT:** cada formiga sorteia aleatoriamente um ponto apto a receber este tipo de estrutura na rede, como sendo seu ponto central da rede.
7. **Verifica restrições OLT:** neste momento é verificada a restrição da distância total entre o ponto cliente até o ponto central da rede. Caso a restrição não seja atendida, um novo ponto deverá ser sorteado.
8. **Verifica se todas as formigas possuem todos os níveis:** estado para controle se nenhuma formiga ficou desatendida de algum nível da rede.
9. **Avalia F.O.:** será avaliado resultado da solução de acordo com a função objetivo transcrita na Equação (4.6).

**Figura 29:** Autômato representando a aplicação de busca solução da Fase 2 - AGMCN



Fonte: Elaborado pelo autor

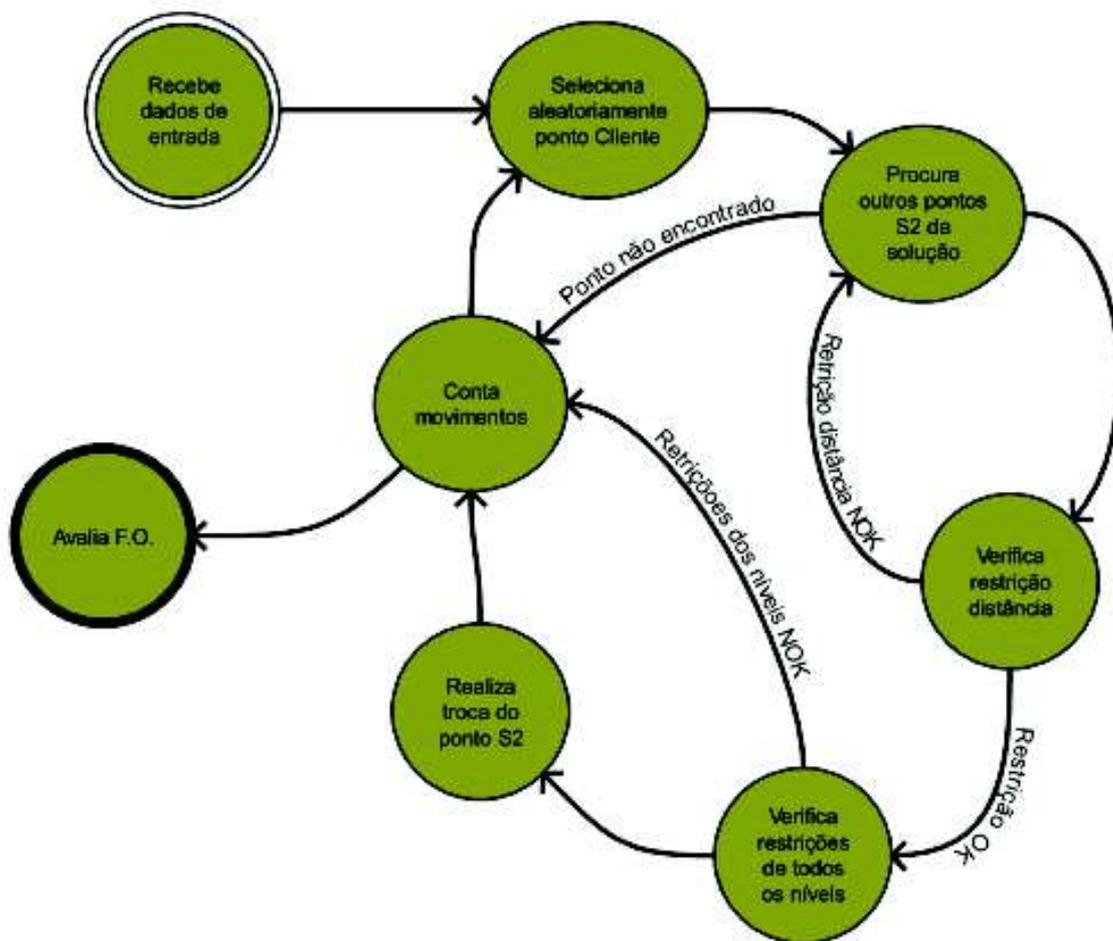
#### 4.2.4.6 Fase 2 - AGMCN: Busca Local

O objetivo da aplicação da busca local é o de verificar, a partir de um ponto cliente aleatório, se pode substituir seu ponto S2 por outro pertencente à solução com distância menor e otimizar a solução. Seus estados estão representados na Figura 30.

1. **Recebe dados entrada:** recebe os dados da solução inicial da AGMCN.
2. **Seleciona aleatoriamente ponto Cliente:** é sorteado aleatoriamente uma formiga que representa um ponto cliente.
3. **Procura outros pontos S2 da solução:** procura outros pontos de nível secundário (S2) definidos na solução inicial.
4. **Verifica restrição de distância:** entre os pontos S2 existentes na solução, é verificado se existe algum que possua distância menor do que o ponto S2 atual da formiga, caso contrário retorna para o estado anterior.
5. **Verifica restrições de todos os níveis:** é verificado se as restrições dos demais níveis são afetadas, caso positivo, a substituição não é efetuada, seguindo para o estado Conta movimentos.

6. **Realiza troca do ponto S2:** neste momento é realizada a troca do ponto S2 da formiga e também atualizadas as conexões entre os níveis como também as variáveis de distâncias.
7. **Conta movimentos:** contabiliza a quantidade de vizinhos gerados que serão realizadas dentro de cada iteração.
8. **Avalia F.O.:** será avaliado o resultado da solução de acordo com a função objetivo transcrita na Equação (4.6).

**Figura 30:** Autômato representando a aplicação de busca local da Fase 2 - AGMCN



Fonte: Elaborado pelo autor

## 5 SIMULAÇÕES E RESULTADOS

O principal objetivo deste capítulo é de descrever uma série de experimentos realizados para verificação da implementação do sistema computacional de otimização para a busca de soluções do problema em estudo, que é desenvolver um sistema capaz de gerar uma rede híbrida (óptica e sem fio) para atendimento de uma cidade inteligente.

É um problema que possui poucas pesquisas e geralmente é tratado em dois subproblemas: o do recobrimento (para a rede sem fio) e o problema de infraestrutura de rede (para localização das facilidades e conexão dos pontos da rede). Desta forma, foram realizadas simulações utilizando bases de dados com tamanhos variados de nós de demanda, através das informações de coordenadas geográficas dos dados.

Conforme definido no capítulo 4, o planejamento de redes aborda, inicialmente, a simulação da área de cobertura para a rede sem fio para todo o perímetro da base de dados e, posteriormente a definição para instalação das facilidades e melhores trajetos para instalação dos cabos de fibra óptica.

Embora o funcionamento do sistema computacional seja de equacionar, num primeiro momento, o problema do recobrimento e em seguida o problema de infraestrutura de rede, para melhor compreensão e análise dos resultados foi adotado o seguinte protocolo:

- Definição das bases de dados de testes;
- Seleção do algoritmo para definição de caminhos mínimos;
- Testes para o problema de infraestrutura de rede;
- Testes para o problema de infraestrutura de rede com a inclusão das restrições de atenuação e custos da rede GPON;
- Testes para o problema do recobrimento e infraestrutura de rede em conjunto (rede híbrida).

Para todos os algoritmos utilizados nos testes, os parâmetros foram definidos por meio de experimentos empíricos. Inicialmente, foram realizados os testes com valores de parâmetros obtidos nas pesquisas relacionadas no Capítulo 3, e, então, os valores dos parâmetros foram alterados para mais e para menos ("sintonizados"), até encontrar os valores que mostraram melhores resultados e desempenho.

Os códigos-fonte foram implementados na linguagem de programação C, e os experimentos foram realizados em um PC-Intel Core i7-450U, 2,6 Ghz com 16 Gbytes de memória, onde somente um núcleo físico de processamento foi utilizado exclusivamente para a execução (sem processamento paralelo).

## 5.1 Bases de Dados para Testes

Na literatura pesquisada, não foram encontradas bases de dados de testes com dados geográficos e com a melhor solução conhecida. Esta mesma situação foi diagnosticada por Silva (2012) que cita a base de testes existente na literatura em Beasley (2010), porém não foi utilizada para os experimentos de sua pesquisa, pois o conteúdo não apresenta as coordenadas geográficas com informações dos níveis adjacentes, e nem informações de vários níveis de planejamento de uma rede.

Por este motivo, os testes para a validação do sistema computacional de otimização, objeto desta pesquisa, foram executados utilizando as bases de dados desenvolvidas e apresentadas na Tese de Doutorado de Silva (2012) e também publicadas no artigo Silva et al. (2013), que foram construídas a partir de bairros distintos da cidade de Curitiba, Paraná, Brasil. As dimensões são apresentadas na Tabela 4. Estes diferentes conjuntos de bases de dados são utilizados para testar o sistema computacional de otimização referente a Fase 2, de geração da AGMCN. Como contribuição deste trabalho, foi criada uma nova base de dados, identificada na Tabela 4 como Base 4 de uma rede já existente na cidade de Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil, utilizando os mesmos parâmetros descritos por Silva (2012).

**Tabela 4:** Bases de dados georreferenciadas

Base de Dados	Nós de demanda	Coordenadas (locais candidatos para instalação de facilidades)	Área (Km <sup>2</sup> )
Base 1	50	390	2,1
Base 2	105	583	2,5
Base 3	405	1624	6,1
Base 4	70	451	3,8

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para a criação da base de dados foi selecionado um polígono, onde são identificados pontos geográficos, em que é factível instalar equipamentos de telecomunicações; e são também identificados os pontos de prospecção de clientes (nós de demanda), os quais devem ser atendidos por uma nova rede. Com estes pontos, foi elaborado um procedimento computacional, baseado em técnicas de geoprocessamento, para criar as arestas que interligam os pontos, considerando os arruamentos existentes na região.

## 5.2 Seleção do algoritmo para definição de caminhos mínimos

A definição do algoritmo para encontrar o melhor caminho foi de vital importância durante a fase de prototipação e testes preliminares, pois impactava diretamente no tempo de processamento para obtenção da solução. A fim de otimizar a necessidade de executar rotinas de obtenção de caminho mínimo na rotina de avaliação do algoritmo de colônia de formigas, bem

como armazenar os caminhos mínimos entre os pares de pontos, foi definido a criação da matriz de distâncias que contém as distâncias mínimas entre todos os pontos da rede e é criada através da utilização do algoritmo de Floyd-Warshall (FLOYD, 1962), pois apresenta desempenho satisfatório e possui uma implementação bastante simples. A geração da matriz de distâncias ocorre antes do início das iterações para busca da solução, quando os caminhos mínimos não precisam ser todas as vezes recalculados e sim simplesmente consultados.

Esta implementação é uma grande diferença entre praticamente todos os trabalhos pesquisados que em sua grande maioria utilizam o algoritmo de Dijkstra para calcular, a cada iteração, as distâncias de menor caminho.

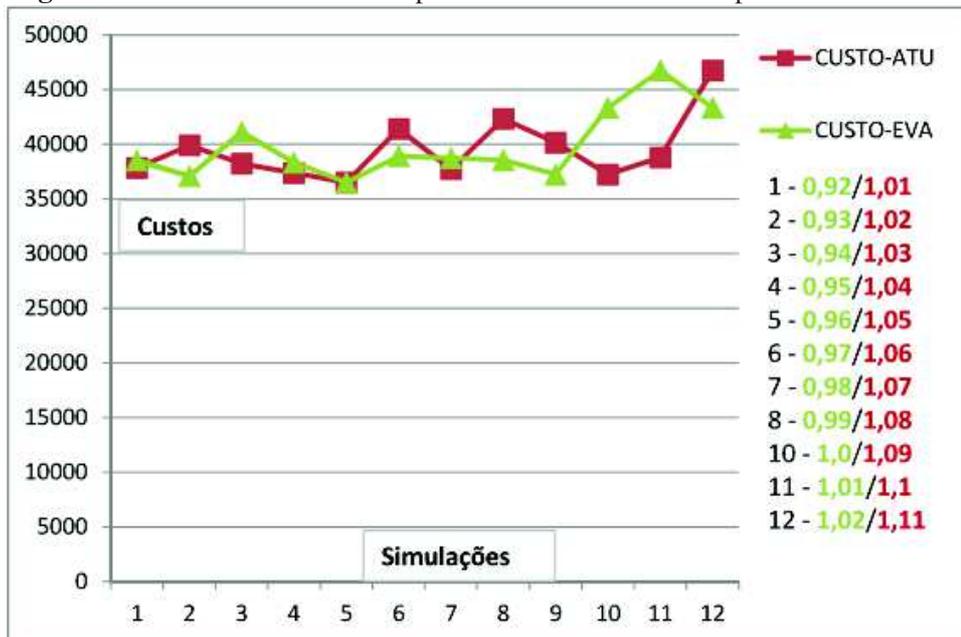
### 5.3 Testes para o problema de infraestrutura de rede

Com a finalidade de validar o método proposto para o desenvolvimento do sistema computacional de otimização para planejamento de redes híbridas, são comparados os resultados da Tese de Doutorado de Silva (2012) e publicados no artigo de Silva et al. (2013), com os obtidos nesta pesquisa. Os resultados obtidos para comparação não levaram em consideração as restrições de atenuação e os custos relacionados com a rede GPON conforme descrito nas fórmulas (4.12), (4.13) e (4.14), pois estas restrições não foram levadas em consideração no trabalho de Silva et al. (2013).

Foram utilizadas nos testes as três primeiras bases, conforme identificado na Tabela 4. Com o objetivo de avaliar a metaheurística de colônia de formigas, foram definidos como parâmetros a taxa de evaporação do feromônio de 0,96 ( $1 - \rho$ ) e a taxa de atualização do feromônio de 1,05 ( $1 - \rho$ ), sendo esta aplicada somente nas melhores soluções. Estes valores foram obtidos através de testes empíricos realizando simulações com diferentes valores para os dois parâmetros. Na Figura 31, são apresentados os valores médios de 30 simulações para cada valor. A linha com triângulos do gráfico identifica os valores médios do custo da solução, mantendo fixo o valor da taxa de evaporação (EVA), ou seja, na posição 1 a taxa foi mantida em 0,92 e foram testados com os diferentes valores para a taxa de atualização (ATU). E da mesma forma a linha com quadrados indica os valores médios do custo da solução mantendo-se fixo o valor da taxa de atualização (ATU) e variando a taxa de evaporação (EVA).

Pode-se observar, na posição 5 do gráfico da Figura 31, o momento quando se obteve os menores custos para a solução com as taxas de evaporação do feromônio em 0,96 e a taxa de atualização do feromônio em 1,05.

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 em um nível é considerado dez vezes maior que o do nível anterior (100 (nível 1), 1000 (nível 2), 10000 (nível

**Figura 31:** Resultados dos Testes para diferentes valores dos parâmetros do ACO

Fonte: Elaborado pelo autor

3), ...). 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 objetivo 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, foi 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.

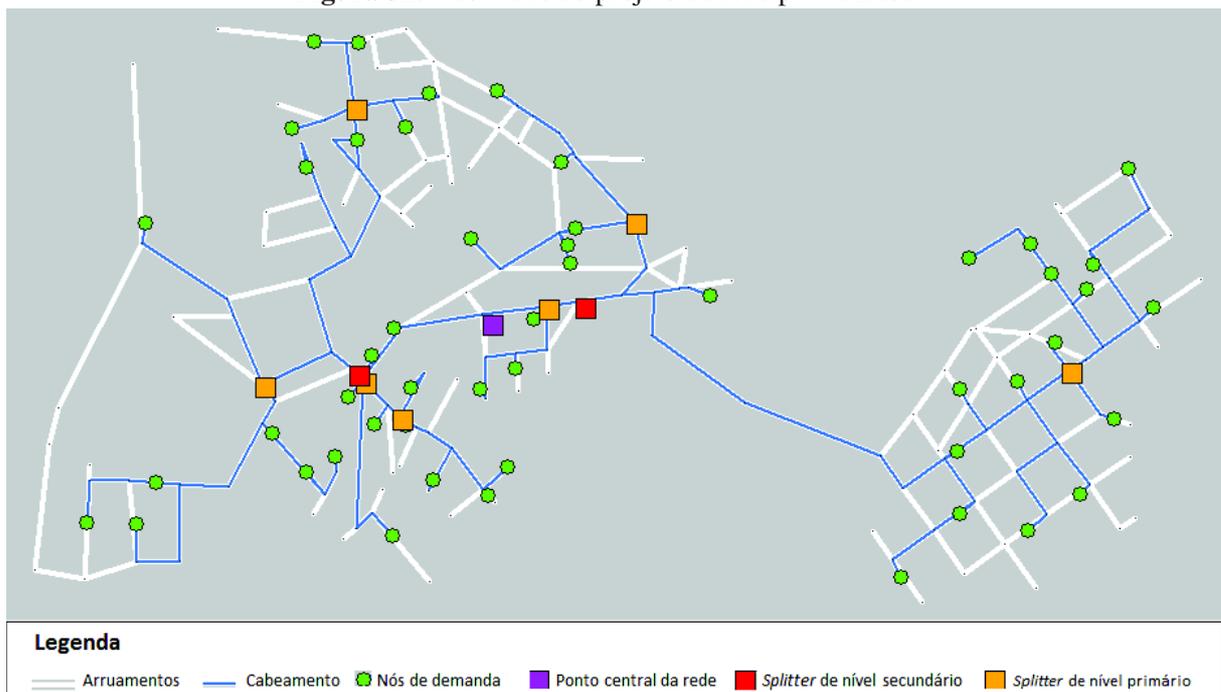
A Tabela 5 apresenta os resultados obtidos pelo algoritmo proposto após 10.000 iterações. Na tabela os resultados estão separados em linhas de cada nível. Cada coluna representa uma base de dados que contabilizam: (a) a quantidade de demandas a serem atendidas; (b) a quantidade de facilidades encontradas para atender as demandas de cada nível; (c) o tempo de execução em segundos; e (d) o custo da solução em unidades monetárias. Os resultados podem ser comparados com a utilização de três metaheurísticas diferentes: o Algoritmo Genético (AG), o Enxame de Partículas (PSO) e a Colônia de Formigas (ACO), sendo que o último apresentou os melhores resultados em relação ao custo total da solução, provavelmente pela decisão de elaborar a matriz de distâncias contendo as distâncias mínimas entre os pontos de rede antes de iniciar a otimização, pois os resultados obtidos demonstram uma melhora de aproximadamente 20%. Na Figura 32, é apresentado o mapa com o resultado da base 1 com os 3 níveis. Para contribuir na compreensão do mapa, os retângulos na cor amarela representam os *splitters* de nível secundário, já os retângulos na cor vermelha representam os *splitters* de nível primário e enquanto os da cor roxa representam o ponto central da rede.

**Tabela 5:** Comparação dos resultados com diferentes métodos para solução do problema de infraestrutura de rede

Algoritmo	Base de Dados	Base 1	Base 2	Base 3
	Demandas	50	105	405
GA (Silva, 2013)	Nível 1	28	46	132
	Nível 2	6	10	81
	Nível 3	1	1	75
	Tempo de Execução (s)	5.589	17.835	213.827
	Custo Total	52.250	73.526	963.382
PSO (Silva, 2013)	Nível 1	14	23	67
	Nível 2	4	4	15
	Nível 3	1	1	3
	Tempo de Execução (s)	5.326	13.922	136.583
	Custo Total	46.476	56.666	184.987
ACO (proposto)	Nível 1	7	12	87
	Nível 2	2	2	9
	Nível 3	1	1	1
	Tempo de Execução (s)	300	480	3.600
	Custo Total	36.530	47.608	149.274
	<b>% Melhoria</b>	<b>21,4%</b>	<b>16,0%</b>	<b>19,3%</b>

Fonte: Elaborado pelo autor.

**Figura 32:** Resultado do projeto da rede para a Base 1



Fonte: Elaborado pelo autor

#### 5.4 Testes para o problema de infraestrutura de rede com a inclusão das restrições de atenuação e custos da rede GPON

Nesta seção, serão comparados os resultados referentes à Base 4 entre um projeto de uma rede existente e o resultado obtido com o sistema computacional de otimização, contemplando as restrições da modelagem matemática que incluem os custos dos tipos de *splitters* utilizados e também a atenuação da rede.

A atenuação óptica sofrida ao longo do enlace enquadra-se como elemento que contribui para as perdas de sinal óptico, que ocorrem devido as suas características construtivas, encontradas principalmente nas emendas, conectores, nos elementos passivos e nas características específicas dos cabos de fibra óptica.

A atenuação óptica torna os enlaces ópticos limitados em comprimento pela atenuação do sinal óptico e a capacidade de transmissão do sinal.

Para o cálculo da atenuação de sinal para cada cliente, foram aplicadas as expressões (4.13) e (4.14) levando em consideração os critérios conforme padrões da ITU-T (ITU-T, 2005) e (ITU-T, 2008):

- Atenuação óptica para fibra monomodo (dB/km): -0,35
- Atenuação máxima da Inserção (dB): -0,3
- Atenuação máxima da Fusão (dB): -0,15
- Atenuação do *Splitter* 1x4 (dB): -6,8
- Atenuação do *Splitter* 1x8 (dB): -10,4
- Atenuação do *Splitter* 1x16 (dB): -14

**Tabela 6:** Resultado dos custos da rede da Base 4 - Sistema computacional x Projetista

<b>Base de Dados 4</b>	<b>Sistema Computacional</b>	<b>Projetista</b>
Demandas	70	70
Nível 1	6	7
Nível 2	2	3
Nível 3	1	1
Tempo de Execução (s)	300	28.800
Custo Rede	45.932	45.078
Custo GPON	35.458	42.793
<b>Custo Total</b>	<b>81.390</b>	<b>87.871</b>

Fonte: Elaborado pelo autor.

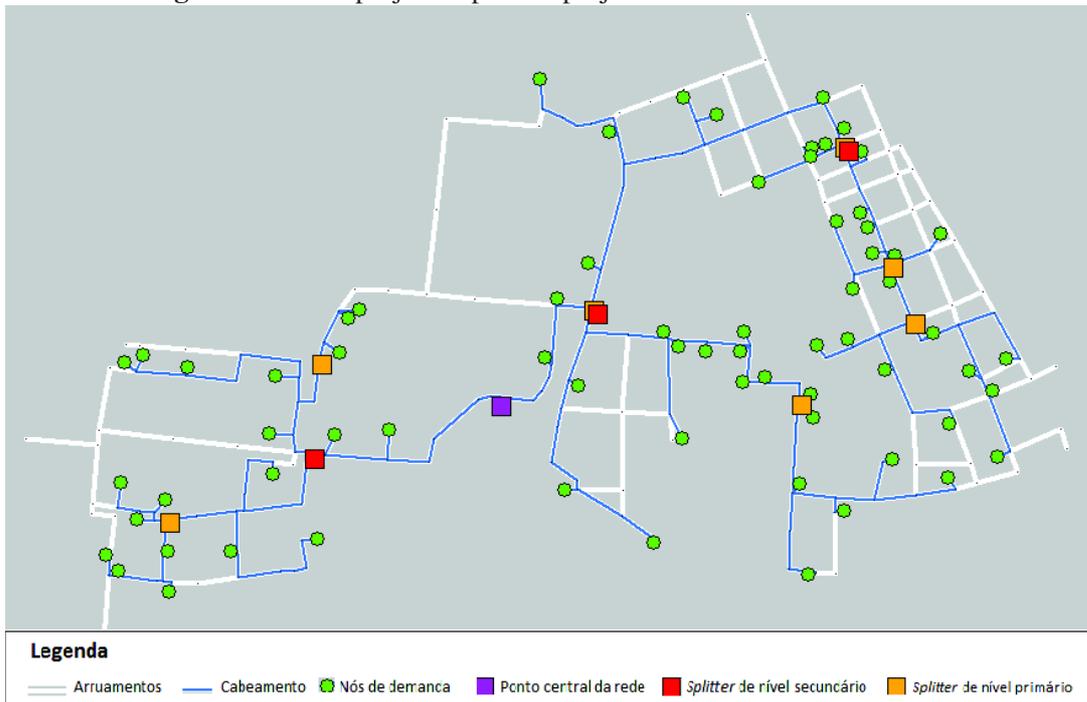
Para cada cliente (nós de demanda), são identificados os elementos necessários para o cálculo da atenuação, como: o comprimento do cabo de fibra óptica, o número de inserções, o número de fusões e os tipos de *splitters* utilizados nos níveis secundário e primário da rede, para enfim obter o resultado do valor da atenuação. Após a execução do sistema computacional foram obtidos os resultados da taxa de atenuação para cada cliente mostrando a viabilidade da rede, pois todos os resultados apurados ficaram acima do limite de atenuação que é de -28 dB.

Na Tabela 6, os resultados estão separados em linhas de cada nível. A terceira coluna representa o projeto de rede existente elaborado por um projetista de forma manual e a segunda coluna pelo sistema computacional de otimização que contabilizam: (a) a quantidade de demandas a serem atendidas; (b) a quantidade de facilidades encontradas para atender as demandas de cada nível; (c) o tempo de execução em segundos; (d) o custo da rede em unidades monetárias; (e) o custo dos equipamentos GPON em unidades monetárias; e (f) o custo total da solução em unidades monetárias. Para obtenção dos custos da linha Custo GPON foi aplicada a Equação (4.12) onde estão expressos os valores monetários para cada tipo de *splitter* utilizado.

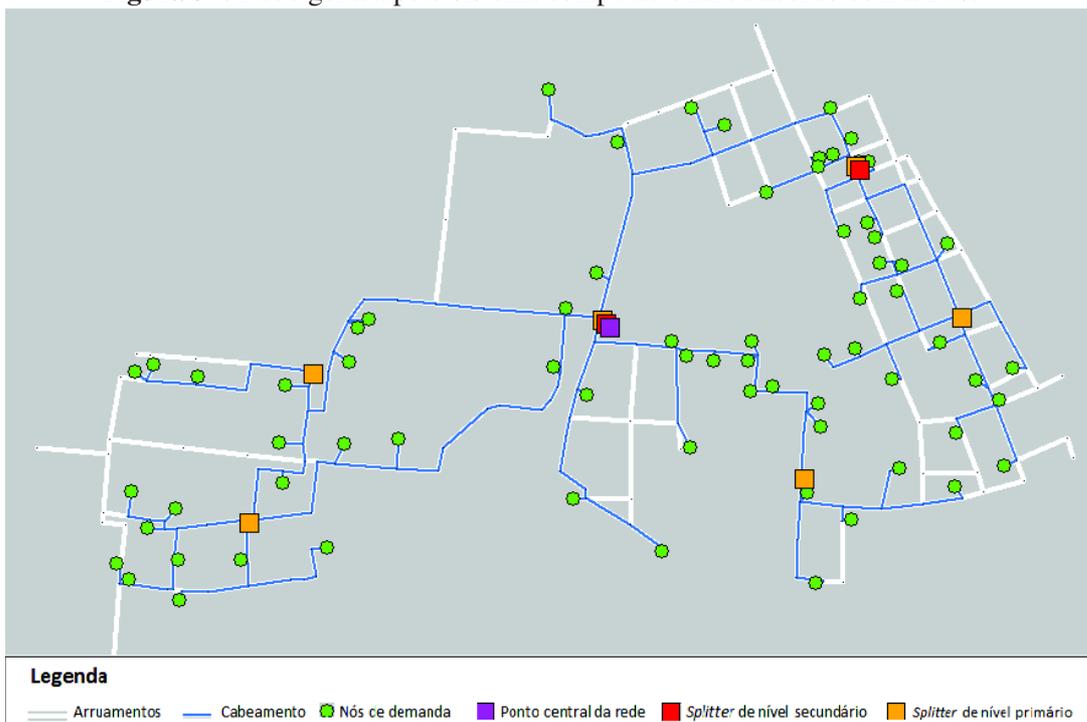
Analisando os resultados obtidos, pode-se constatar que a rede elaborada pelo projetista teve um custo menor na parte da definição de instalação de cabos de aproximadamente 1,8%, porém em termos de otimização do uso dos equipamentos GPON o sistema computacional de otimização obteve um resultado melhor, apresentando uma melhoria de 17,1%. Também cabe ressaltar a questão envolvida com o tempo de execução, que para o sistema computacional de otimização tem um custo de 5 minutos e já para o projetista é de 8 horas, que representa uma melhoria de 98,9%.

Para a obtenção dos resultados da Base 4, foram executados 30 testes e obteve-se como média o valor informado na Tabela 6 e tendo como variação de 2,7% entre o custo total mínimo e máximo.

Nas Figuras 33 e 34, são apresentados os mapas com as redes elaboradas pelo projetista e pelo sistema computacional de otimização. Para contribuir na compreensão dos mapas os retângulos na cor amarela representam os *splitters* de nível secundário, já os retângulos na cor vermelha representam os *splitters* de nível primário e enquanto os da cor roxa representam o ponto central da rede.

**Figura 33:** Rede projetada por um projetista de acordo com a Base 4

Fonte: Elaborado pelo autor

**Figura 34:** Rede gerada pelo sistema computacional de acordo com a Base 4

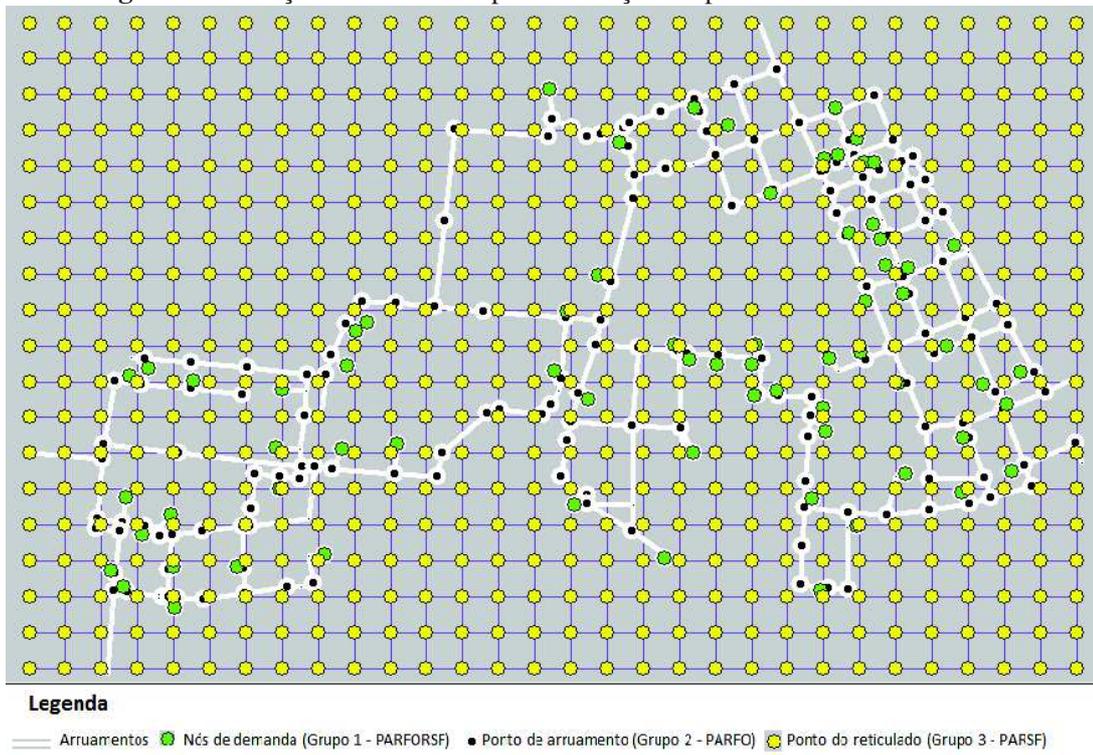
Fonte: Elaborado pelo autor

## 5.5 Testes para o problema do recobrimento e infraestrutura de rede em conjunto

Como definido no início deste capítulo, nesta seção serão apresentados os resultados obtidos com a Fase 1 - Recobrimento e com a Fase 2 - AGMCN do sistema computacional de otimização.

Como estratégia para encontrar uma solução viável para o problema do recobrimento, foi definida a criação de um reticulado de pontos em toda a área envolvida nas bases de dados, ou seja, verificou-se as coordenadas extremas a fim de estipular a área total. Após esta etapa, definiu-se a granularidade para criação dos pontos, que nos testes foi utilizada a distância de 85 metros. Assim, além de todos os pontos já existentes nas bases de dados, estes também foram adicionados, como pode ser visualizado na Figura 35.

**Figura 35:** Criação do reticulado para resolução do problema do recobrimento



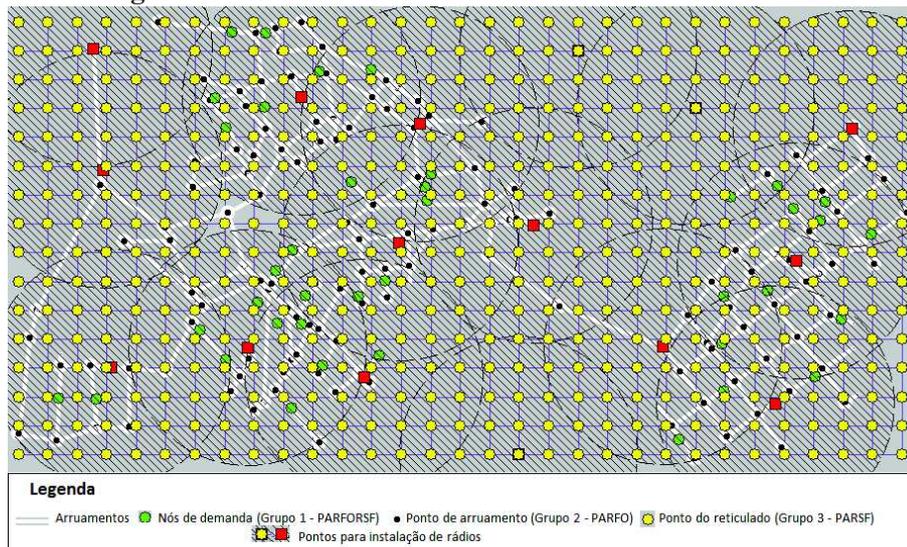
Fonte: Elaborado pelo autor

Da mesma forma que para a Fase 2, foi gerada a matriz de distâncias mínimas entre todos os pontos para posteriormente prosseguir com as demais rotinas do sistema computacional de otimização, conforme descrito na Seção 4.2.4.

Nas Figuras 36 e 37, pode-se visualizar o resultado da Fase 1 do recobrimento aplicado na Base 1 e Base 4 respectivamente. Para a obtenção dos custos, foi utilizada a mesma proposição dos níveis da Fase 2, porém foram criados três tipos de locais candidatos a receberem uma estrutura para a rede sem fio. A primeira, (Grupo 1) com o menor custo, são os clientes (nós de demanda - PARFORSF), pois são os candidatos normais a hospedarem este tipo de estrutura

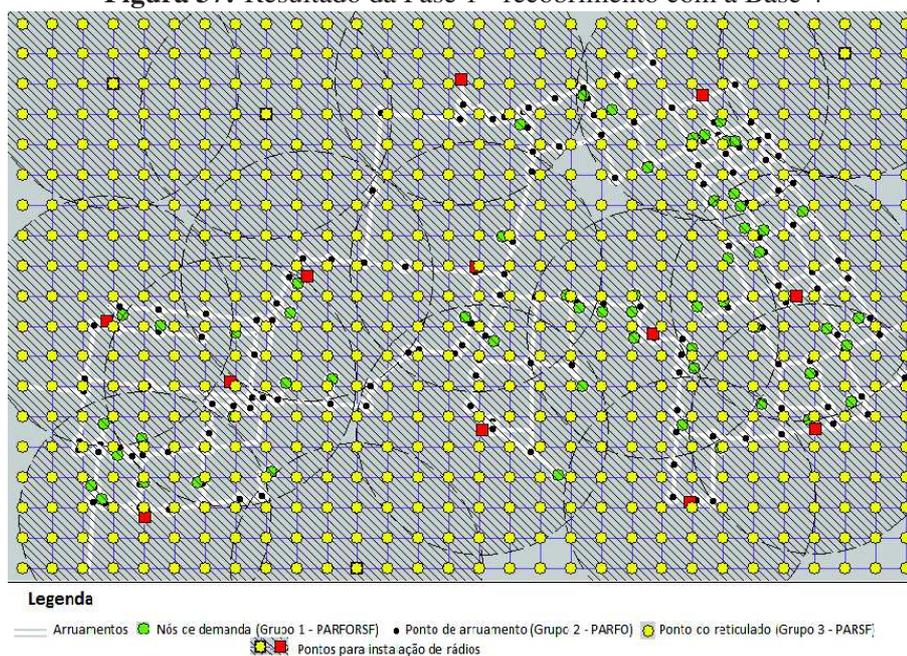
por já receberem a rede de fibra óptica. O segundo grupo (Grupo 2) é formado pelos pontos de coordenadas geográficas que formam as ruas onde serão instalados os cabos de fibras ópticas (PARFO). Por último, o terceiro grupo (Grupo 3) foi definido como qualquer ponto do reticulado adicionado às bases de dados para obtenção da solução (PARSF). Assim, os pontos do grupo 1 possuem um custo de 100 unidades monetárias, o grupo 2 de 1.000 unidades monetárias e, respectivamente, o grupo 3 um custo de 10.000 unidades monetárias.

**Figura 36:** Resultado da Fase 1 - recobrimento com a Base 1



Fonte: Elaborado pelo autor

**Figura 37:** Resultado da Fase 1 - recobrimento com a Base 4



Fonte: Elaborado pelo autor

Na Tabela 7, é apresentado o resultado completo da rede híbrida, ou seja, com a execução das duas fases, primeiro a do recobrimento onde se contabilizou os custos dos pontos a serem utilizados para atender o recobrimento da rede e, após na Fase 2, são apresentados os resultados da rede de fibra óptica com a tecnologia GPON, tendo como entrada os nós de demanda da base de dados original acrescidos dos nós de demanda necessários para o atendimento da rede sem fio. Como na literatura não foram encontrados dados para serem confrontados, os mesmos são meramente informativos.

Para a obtenção dos resultados mostrados na Tabela 7, foram executados 30 testes e obteve-se como média os valores exibidos, e tendo como variação de 3,4% entre o custo total mínimo e máximo.

**Tabela 7:** Resultado dos custos da Rede Híbrida das Bases 1 e 4

<b>Fases</b>	<b>Base de Dados</b>	<b>Base 1</b>	<b>Base 4</b>
	Demandas	50	70
	<b>Total de Pontos</b>	<b>936</b>	<b>826</b>
<b>Fase 1 - Recobrimento</b>	Grupo 1	11	12
	Grupo 2	2	0
	Grupo 3	3	4
	Tempo de Execução (s)	1.800	1.800
	Custo Rede sem fio	33.100	41.200
<b>Fase 2 - AGMCN</b>	Demandas (base de dados + fase 1)	55	74
	Nível 1	7	6
	Nível 2	2	2
	Nível 3	1	1
	Tempo de Execução (s)	300	300
	Custo Rede fibra	40.123	49.394
	Custo GPON	40.073	35.458
	<b>Custo Total</b>	<b>113.296</b>	<b>126.052</b>

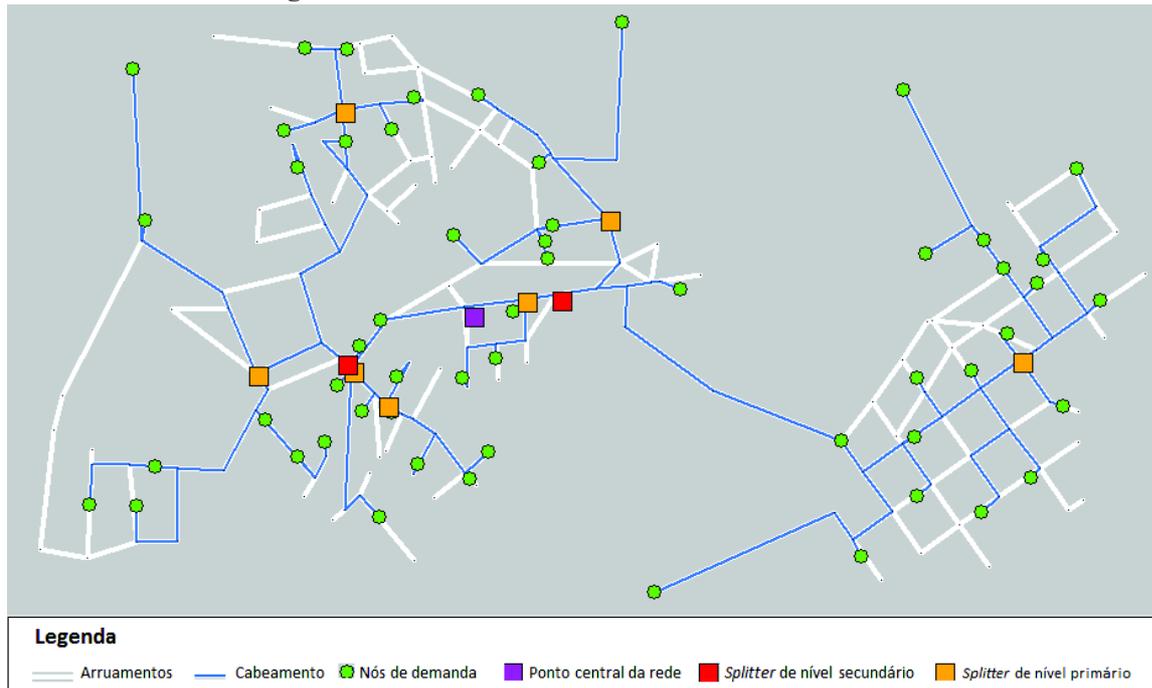
Fonte: Elaborado pelo autor.

Ao analisar os resultados, pode-se observar que a solução da Fase 1 acarretou em poucos nós de demanda como entrada para a segunda fase, ocasionando assim em poucas alterações nas quantidades de equipamentos da rede GPON para atendimento destas novas demandas, impactando basicamente no aumento do custo da rede de fibra óptica, ou seja, os trajetos dos novos caminhos formados. Comparando com os resultados obtidos com a execução somente da Fase 2 para as Bases 1 e 4 obteve-se um incremento no custo total da solução de aproximadamente de 8,9% para a Base 1 e 7,1% para a Base 4. Assim, pode-se inferir que, para o atendimento das demandas de uma cidade inteligente, tendo como intenção o recobrimento da cidade com a rede sem fio, o custo para atingir essa intenção é da ordem de 10% do custo da instalação da rede de fibra óptica. Para se obter esses resultados, foi utilizado o recurso de extensão de arruamentos, ou seja, para os pontos do grupo 3 onde não existem arruamentos, os mesmos foram criados a partir de um ponto de arruamento mais próximo. Porém, cabe salientar que

estes custos podem mudar de acordo com as características de cada cidade, como edificações, elevações geográficas, etc.

Nas Figuras 38 e 39 são apresentados os mapas com as redes das Bases 1 e 4. Para contribuir na compreensão dos mapas, os retângulos na cor amarela representam os *splitters* de nível secundário, já os retângulos na cor vermelha representam os *splitters* de nível primário e enquanto os da cor roxa representam o ponto central da rede.

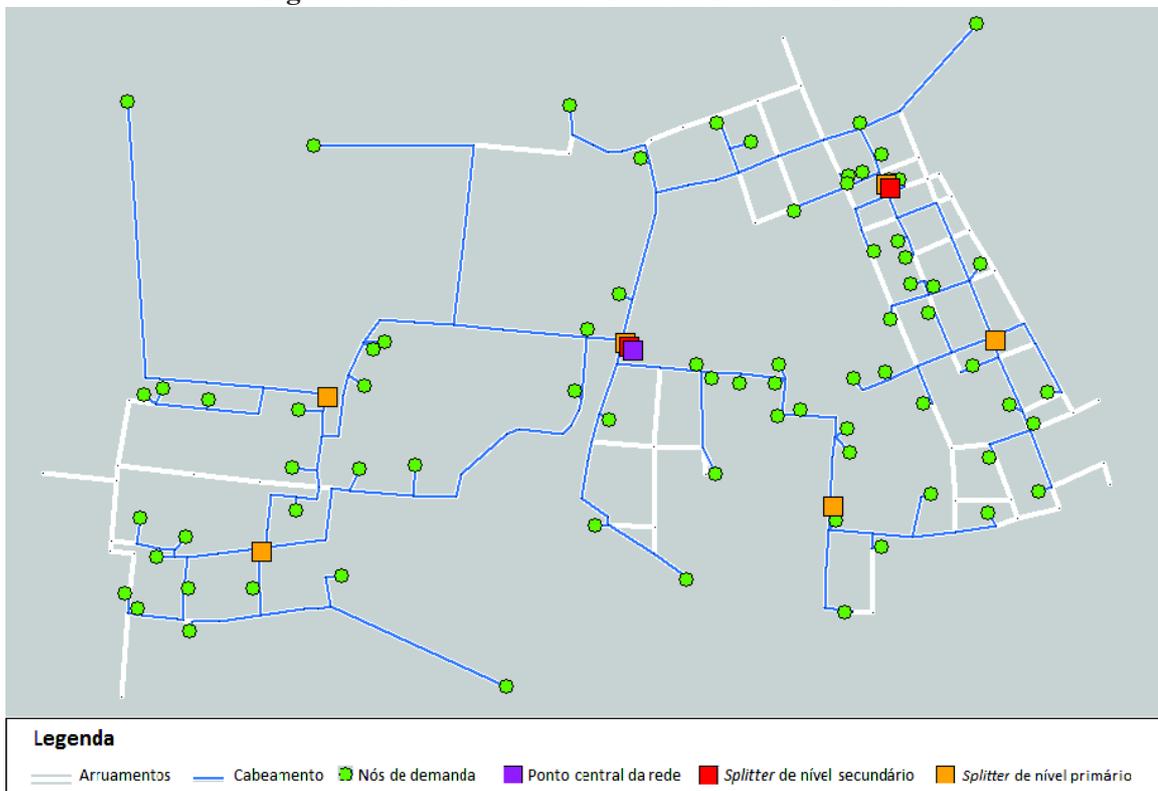
**Figura 38:** Resultado Final - Fase 1 e 2 - com a Base 1



Fonte: Elaborado pelo autor

Também, como na seção anterior, para cada cliente (nós de demanda), são identificados os elementos necessários para o cálculo da atenuação, como: o comprimento do cabo de fibra óptica, o número de inserções, o número de fusões e os tipos de *splitters* utilizados nos níveis secundário e primário da rede, para enfim obter o resultado do valor da atenuação. Após a execução do sistema computacional foram obtidos os resultados da taxa de atenuação para cada cliente mostrando a viabilidade da rede, pois todos os resultados apurados ficaram acima do limite de atenuação que é de -28 dB.

**Figura 39:** Resultado Final - Fase 1 e 2 - com a Base 4



Fonte: Elaborado pelo autor



## 6 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Esta dissertação descreveu o desenvolvimento de uma metodologia utilizada na elaboração de um sistema computacional, baseado em um conjunto de regras definidas por uma modelagem matemática, para apoio ao projeto de redes híbridas (ópticas e sem fio) para atendimento das demandas de uma cidade inteligente. Na literatura pesquisada, não foi encontrada a resolução para o problema de redes híbridas de forma específica, mas sim em dois problemas distintos: o do recobrimento (para atendimento das demandas da rede sem fio) e o de infraestrutura de redes (para o atendimento da rede de fibras ópticas).

Este sistema computacional utiliza como referência os pontos físicos da administração municipal, como escolas, postos de saúde e secretarias, que deveriam receber uma rede de comunicação via fibra óptica. A partir destes pontos, numa primeira fase, é projetada uma rede sem fio que possua cobertura em uma área de abrangência a ser definida e que pode necessitar de mais pontos da rede de fibra óptica além daqueles já mencionados, gerando como solução a localização dos pontos onde serão instalados os rádios da rede sem fio e também a indicação de novas demandas de pontos que necessitarão da rede de fibra óptica. Numa segunda fase, é verificada a solução para resolução do problema de infraestrutura de redes que tem como entrada as demandas originais e também aquelas geradas pela fase do recobrimento.

Para obtenção da solução, o sistema computacional foi desenvolvido utilizando a metaheurística de colônia de formigas que, quando comparada com os resultados já publicados na literatura utilizando outras metaheurísticas, obteve-se resultados melhores de aproximadamente 20% para o problema de infraestrutura de rede. Cabe ressaltar, também, que o sistema computacional processa inicialmente todas as informações necessárias para formação de caminhos mínimos, o que acarretou uma redução no tempo de execução para obtenção da solução. Já para o problema do recobrimento, não foram encontrados resultados conhecidos que utilizassem bases de dados com coordenadas geográficas, sendo assim não pode-se afirmar que os resultados apresentados sejam satisfatórios, o que demanda trabalhos futuros para comparação com outras metaheurísticas.

Procurando responder a questão desta pesquisa: "como projetar a rede de acesso metropolitana que satisfaz os requisitos de aplicação para a cidade inteligente?", foram pesquisadas diversas topologias de rede já utilizadas e elencadas no Capítulo 2 deste trabalho. Com o foco na elaboração de projetos de redes físicas, ou seja, por quais caminhos instalar os cabos de fibras ópticas, e os melhores locais para instalação de equipamentos, o sistema computacional gerou uma solução visando disponibilizar conectividade de rede a todas as demandas para a cidade inteligente, de forma a otimizar o seu custo de instalação.

Levando em consideração a realidade de grande parte das cidades brasileiras, que possuem poucos recursos financeiros e também de recursos humanos especializados, até para o atendimento das necessidades básicas da população, se faz necessário um trabalho de planejamento para a melhor aplicação destes recursos. Desta forma, o desenvolvimento de um sistema com-

putacional que possa gerar o resultado de uma rede a ser construída e que atenda os diferentes tipos de demanda de uma cidade inteligente, se concebeu a construção do sistema computacional objeto da pesquisa desta dissertação.

Revisando as contribuições propostas no início deste trabalho pode-se sintetizar que as mesmas foram obtidas, pois foi investigado o estado da arte de redes metropolitanas e redes de acesso heterogêneas e diferentes tecnologias utilizadas em tais redes. Como também foi proposta uma arquitetura de rede de acesso metropolitana que atenda aos requisitos da cidade e inteligente e o planejamento e dimensionamento dessa arquitetura em um cenário real foi testado e validado através do sistema computacional desenvolvido.

Como atividades para trabalhos futuros podemos destacar:

- A implementação de técnicas de busca metaheurísticas diferenciadas da técnica proposta para o problema do recobrimento, com a finalidade de comparação entre os algoritmos propostos, possibilitando melhorias no algoritmo desenvolvido;
- Prever novas variáveis na busca pela solução, como, por exemplo, a previsão de obstáculos entre os pontos da rede sem fio, tais como prédios, vegetação ou outros, que pudessem interferir nas comunicações da rede sem fio;
- O desenvolvimento de uma interface gráfica que interaja com uma ferramenta de geoprocessamento para definição de pontos e demarcação de áreas de cobertura para otimizar a obtenção das informações de coordenadas geográficas;
- Criar uma metodologia para extração de dados de testes em bases de dados de coordenadas geográficas (sistemas SIG) através de um formato padrão de base de dados para ser utilizado em trabalhos similares;
- Adaptar o sistema computacional para possibilitar a expansão ou adequação de uma rede já existente, através de um mecanismo que recupere uma solução inicial e tentar um novo processamento para alcançar uma nova solução.

## REFERÊNCIAS

- AGRAWAL, G. P. **Sistemas de comunicação por fibra óptica**. São Paulo: Elsevier - Campus, 2014.
- ALMEIDA, W. G. D. **Métodos Heurísticos Para O Problema de Localização de Concentradores**. 2009. Dissertação (Mestrado em Computação Aplicada) — INPE, São José do Campos, 2009.
- ARROYO, J. E. C. Heurística GRASP aplicado ao problema de alocação de antenas de transmissão. **XXXVIII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional**, Goiânia, p. 1345–1356, 2006.
- BARRETO, M. B. **Estratégias para planejamento e recomposição em redes de telecomunicações**. 2011. Dissertação (Mestrado em Computação Aplicada) — UNISINOS, São Leopoldo, 2011.
- BEASLEY, J. E. OR-Library: distributing test problems. , [S.l.], 2010. Disponível em: <<http://people.brunel.ac.uk/~mastjjb/jeb/info.html>>. Acesso em: 10 novembro 2015.
- CHAMBERLAND, S. Planning multitechnology access networks with performance constraints. **Lecture Notes of the Institute for Computer Sciences, Social-Informatics and Telecommunications Engineering**, [S.l.], v. 6 LNICST, p. 410–426, 2009.
- CHIU, P. L.; LIN, F. Y. S. A Simulated Annealing Algorithm To Support the Sensor Placement For Target Location. **Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering**, [S.l.], p. 867–870, 2004.
- CHOWDHURY, P.; TORNATORE, M.; SARKAR, S.; MUKHERJEE, B. Building a green wireless-optical broadband access network (WOBAN). **Journal of Lightwave Technology**, [S.l.], v. 28, n. 16, p. 2219–2229, 2010.
- DORIGO, M.; BLUM, C. Ant colony optimization theory: a survey. **Theoretical Computer Science**, [S.l.], v. 344, n. 2-3, p. 243–278, 2005.
- DORIGO, M.; MANIEZZO, V.; COLORNI, A. Ant system: optimization by a colony of cooperating agents. **IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics**, [S.l.], v. 26, n. 1, p. 29–41, 1996.
- FANG, X.; MISRA, S.; XUE, G.; YANG, D. Smart Grid — The New and Improved Power Grid: a survey. **IEEE Communications Surveys & Tutorials**, [S.l.], v. 14, n. 4, p. 944–980, 2012.
- FIRMINO, R. J.; TREVISAN, E. Eyes of glass: watching the watchers in the monitoring of public places in Curitiba, Brazil. **Surveillance and Society**, [S.l.], v. 10, n. 1, p. 28–41, 2012.
- FLOYD, R. W. Algorithm 97: shortest path. **Communications of the ACM** 5, [S.l.], v. 6, 1962.
- FURUKAWA. **Furukawa**. Disponível em: <[www.furukawa.com.br/br/produtos/na/splitter-optico-balanceado-732.html](http://www.furukawa.com.br/br/produtos/na/splitter-optico-balanceado-732.html)>. Acesso em: 10 novembro 2015.

FUTON. **Futon**. Disponível em: <<http://www.ict-futon.eu/processing.aspx>>. Acesso em: 10 novembro 2015.

GAMVROS, I.; GOLDEN, B.; RAGHAVAN, S. The Multilevel Capacitated Minimum Spanning Tree Problem. **INFORMS Journal on Computing**, [S.l.], v. 18, n. 3, p. 348–365, 2006.

GAMVROS, I.; RAGHAVAN, S.; GOLDEN, B. An evolutionary approach to the multi-level capacitated minimum spanning tree problem. **Telecommunications Network Design and Management**, [S.l.], p. 99–124, 2002.

GHAZISAIDI, N.; MAIER, M. Fiber-wireless (FiWi) access networks: challenges and opportunities. **IEEE Network**, [S.l.], v. 25, n. 1, p. 36–42, 2011.

GOLDBARG, M. C.; LUNA, H. P. L. **Otimização combinatória e programação linear: modelos e algoritmos**. Rio de Janeiro: Campus, 2000.

GROSS, J. L.; YELLEN, J. **Graph theory and its applications**. Boca Raton: Chapman & Hall, 2006.

IEEE. **IEEE 802.3ah - Ethernet in the First Mile Task Force**. Disponível em: <<http://ieee802.org/3/efm/public/index.html>>. Acesso em: 10 novembro 2015.

INTEL. **Intel**. Disponível em: <<https://embedded.communities.intel.com/community/en/applications/blog/2012/09/11/roving-reporter-intel-intelligent-systems-framework-simplifies-internet-of-things>>. Acesso em: 10 novembro 2015.

ITU-T. G.983.1 - Broadband optical access systems based on Passive Optical Networks (PON). **International Telecommunication Union**, [S.l.], p. 1–124, 2005.

ITU-T. G.984.1 - Gigabit-capable passive optical networks (GPON): general characteristics. **International Telecommunication Union**, [S.l.], p. 1–43, 2008.

KATARA, A.; BAPAT, A.; SELOKAR, A.; CHALSE, R. Hybrid Optical Wireless Access Networks. **Computational Intelligence and Communication Networks (CICN), 2013 5th International Conference on**, [S.l.], p. 146–149, 2013.

KAZOVSKY, B. L.; WONG, S.-w.; AYHAN, T.; ALBEYOGLU, K. M.; RIBEIRO, M. R. N.; SHASTRI, A. Hybrid Optical – Wireless Access Networks. **Proceedings of the IEEE**, [S.l.], v. 100, n. 5, p. 1–29, 2012.

LEE, J. H.; HANCOCK, M. G.; HU, M. C. Towards an effective framework for building smart cities: lessons from seoul and san francisco. **Technological Forecasting and Social Change**, [S.l.], v. 89, p. 80–99, 2013.

LI, Y. L. Y.; WANG, J. W. J.; QIAO, C. Q. C.; GUMASTE, a.; XU, Y. X. Y.; XU, Y. X. Y. Integrated Fiber-Wireless (FiWi) Access Networks Supporting Inter-ONU Communications. **Journal of Lightwave Technology**, [S.l.], v. 28, n. 5, p. 714–724, 2010.

LIVRAMENTO, S. **Algoritmos genéticos para o problema de localização de recursos em rede telefonica**. 2004. Dissertação (Mestrado em Computação Aplicada) — UNICAMP, Campinas, 2004.

MAIA, L. P. **Arquitetura de redes de computadores**. Rio de Janeiro: LTC, 2013.

MARTINS, E. A. **Um sistema computacional para apoio a projetos de redes de comunicação em sistemas centralizados de medição de consumo e tarifação de energia elétrica: desenvolvimento e implementação através de uma abordagem metaheurística**. 2013. Dissertação (Mestrado em Computação Aplicada) — UNISINOS, São Leopoldo, 2013.

MONTEIRO, M. S. R.; FONTES, D. B. M. M.; FONTES, F. A. C. C. The hop-constrained minimum cost flow spanning tree problem with nonlinear costs: an ant colony optimization approach. **Optimization Letters**, [S.l.], v. 9, n. 3, p. 451–464, 2015.

NETTO, P. O. B. **Grafos: teoria, modelos, algoritmos**. São Paulo: Blucher, 2011.

NIST; PUBLICATION, N. S.; National Institute of Standards and Technology. NIST Special Publication 1108 NIST Framework and Roadmap for Smart Grid Interoperability Standards. **Nist Special Publication**, [S.l.], v. 0, n. October, p. 1–90, 2010.

OECD. **OECD Environmental Outlook to 2050: the consequences of inaction**. Disponível em: <[www.oecd.org/environment/outlookto2050](http://www.oecd.org/environment/outlookto2050)>. Acesso em: 1 novembro 2015.

PAPADIMITRIOU, C. H.; LEWIS, H. R. **Elementos de Teoria da Computação**. São Paulo: Prentice Hall, 1998.

PAPPAS, C. a.; ANADIOTIS, A. C. G.; PAPAGIANNI, C. a.; VENIERIS, I. S. Heuristics for the multi-level capacitated minimum spanning tree problem. **Optimization Letters**, [S.l.], v. 8, n. 2, p. 435–446, 2014.

PETROLO, R.; LOSCRÍ, V.; MITTON, N. 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**, [S.l.], p. 61–66, 2014.

PIRO, G.; CIANCI, I.; GRIECO, L. A.; BOGGIA, G.; CAMARDA, P. Information centric services in Smart Cities. **Journal of Systems and Software**, [S.l.], v. 88, n. 1, p. 169–188, 2014.

RESENDE, M. G. C. Biased random-key genetic algorithms with applications in telecommunications. **Top**, [S.l.], v. 20, n. 1, p. 130–153, 2012.

SEGARRA, J.; SALES, V.; PRAT, J. Planning and designing FTTH networks: elements, tools and practical issues. **International Conference on Transparent Optical Networks**, [S.l.], p. 1–6, 2012.

SHADDAD, R.; MOHAMMAD a.B.; AL-GAILANI, S.; AL-HETAR a.M.; ELMAGZOUN, M. A survey on access technologies for broadband optical and wireless networks. **Journal of Network and Computer Applications**, [S.l.], v. 41, p. 459–472, 2014.

SHADDAD, R.; MOHAMMAD a.B.; AL-HETAR a.M. Analysis of physical layer performance of hybrid optical–wireless access network. **Optics Communications**, [S.l.], v. 284, n. 20, p. 4894–4899, 2011.

SHAW W. T., W. S. C. N. K. L. G. MARIN hybrid optical-wireless access network. **Optical Fiber Communication and the National Fiber Optic Engineers**, [S.l.], 2007.

SHAW, W.-T.; WONG, S.-W.; YEN, S.-H.; KAZOVSKY, L. G. An ultra-scalable broadband architecture for municipal hybrid wireless access using optical grid network. **Optical Fiber Communication**, [S.l.], p. 1–3, 2009.

SILVA, H. A. D.; De Souza Britto, A.; OLIVEIRA, L. E. S. D.; KOERICH, A. L. Network infrastructure design with a multilevel algorithm. **Expert Systems with Applications**, [S.l.], v. 40, n. 9, p. 3471–3480, 2013.

SILVA, H. **Algoritmo de Otimização Multinível Aplicado a Problemas de Planejamento de Redes**. 2012. 129 p. Tese (Doutorado em Ciência da Computação) — PUCPR, Curitiba, 2012.

SUKODE, S.; GITE, P. S.; AGRAWAL, H. Context Aware Framework in IoT : a survey. **International Journal of Advanced Trends in Computer Science and Engineering**, [S.l.], v. 4, n. 1, p. 1–9, 2015.

TELECO. **Teleco**. Disponível em: <[www.teleco.com.br/tutoriais.asp](http://www.teleco.com.br/tutoriais.asp)>. Acesso em: 10 novembro 2015.

TESORIERE, G.; GIUFFRÈ, T.; BARONE, R. E.; MORGANO, M. A.; SINISCALCHI, S. M. Architecture for parking management in smart cities. **IET Intelligent Transport Systems**, [S.l.], v. 8, n. August 2013, p. 445–452, 2014.

VARVARIGOS, E. a.; CHRISTODOULOPOULOS, K. Algorithmic aspects in planning fixed and flexible optical networks with emphasis on linear optimization and heuristic techniques. **Journal of Lightwave Technology**, [S.l.], v. 32, n. 4, p. 681–693, 2014.

WATCHARASITTHIWAT, K.; WARDKEIN, P. Reliability optimization of topology communication network design using an improved ant colony optimization. **Computers and Electrical Engineering**, [S.l.], v. 35, n. 5, p. 730–747, 2009.