

UNIVERSIDADE CANDIDO MENDES – UCAM  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM PESQUISA OPERACIONAL E  
INTELIGÊNCIA COMPUTACIONAL  
MESTRADO EM PESQUISA OPERACIONAL E INTELIGÊNCIA COMPUTACIONAL

MITER MAYER DE OLIVEIRA FERREIRA

METAHEURÍSTICAS ALGORÍTMOS GENÉTICOS E GRASP APLICADAS AO  
POSICIONAMENTO DE TORRES DE TRANSMISSÃO DE SINAL DE INTERNET

CAMPOS DOS GAYTACAZES/RJ  
Outubro de 2017

UNIVERSIDADE CANDIDO MENDES – UCAM  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM PESQUISA OPERACIONAL E  
INTELIGÊNCIA COMPUTACIONAL  
MESTRADO EM PESQUISA OPERACIONAL E INTELIGÊNCIA COMPUTACIONAL

MITER MAYER DE OLIVEIRA FERREIRA

METAHEURÍSTICAS ALGORÍTMOS GENÉTICOS E GRASP APLICADAS AO  
POSICIONAMENTO DE TORRES DE TRANSMISSÃO DE SINAL DE INTERNET

Dissertação apresentada ao Programa de  
Mestrado em Pesquisa Operacional e  
Inteligência Computacional da Universidade  
Candido Mendes - Campos/RJ, para obtenção  
do grau de MESTRE EM PESQUISA  
OPERACIONAL E INTELIGÊNCIA  
COMPUTACIONAL.

Orientador: Prof. Dr. Ítalo Oliveira Matias.  
Coorientador: Prof. Dr. Dalessandro Soares Vianna.

CAMPOS DOS GOYTACAZES/RJ  
Outubro de 2017

## FICHA CATALOGRÁFICA

Preparada pela Biblioteca da **UCAM – CAMPOS** 002/2018

Ferreira, Miter Mayer de Oliveira.

Metaheurísticas algoritmos genéticos e grasp aplicadas ao posicionamento de torres de transmissão de sinal de internet. / Miter Mayer de Oliveira Ferreira. – 2017.

77 f.; il.

Orientador: Ítalo Oliveira Matias.

Dissertação de Mestrado em Pesquisa Operacional e Inteligência Computacional – Universidade Candido Mendes – Campos. Campos dos Goytacazes, RJ, 2017.

Referências: f. 72-77

1. Metaheurísticas – Algoritmos genéticos. 2. GRASP. I. Universidade Candido Mendes – Campos. II. Título.

CDU – 004.2

Bibliotecária Responsável: Flávia Mastrogirolamo CRB 7<sup>a</sup>-6723

MITER MAYER DE OLIVEIRA FERREIRA

METAHEURÍSTICAS ALGORÍTMOS GENÉTICOS E GRASP APLICADAS AO  
POSICIONAMENTO DE TORRES DE TRANSMISSÃO DE SINAL DE INTERNET

Dissertação apresentada ao Programa de Mestrado em Pesquisa Operacional e Inteligência Computacional da Universidade Candido Mendes - Campos/RJ, para obtenção do grau de MESTRE EM PESQUISA OPERACIONAL E INTELIGÊNCIA COMPUTACIONAL.

Aprovada em: 06 /10/2017.

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. Ítalo de Oliveira Matias – Orientador  
Universidade Candido Mendes (UCAM)

---

Prof. Dr. Dalessandro Soares Vianna - Coorientador  
Universidade Candido Mendes (UCAM)

---

Prof. Dr. Eglon Rhuan Salazar Guimarães  
Universidade Estadual Norte Fluminense (UENF)

---

Prof. Dr. Aldo Shimoya  
Universidade Candido Mendes (UCAM)

Campos dos Goytacazes, RJ  
Outubro de 2017

Dedico este trabalho aos meus filhos. Que o mesmo possa servir de incentivo aos seus estudos e em suas formações e para a vida.

Dedico também à dona Eurides Macedo de Oliveira (*in memoriam*), minha mãe duas vezes, que me criou e me orientou, sempre indicando o caminho correto.

## Agradecimentos

Agradeço a Deus em primeiro lugar, pois sem ele eu não teria forças para seguir nesta longa jornada. Também agradeço aos meus professores e amigos pela ajuda e incentivo durante esse período

À DATACI, empresa na qual trabalho há vários anos e que sempre proporcionou boa formação aos seus colaboradores.

A UCAM – Campos/RJ e seu corpo docente que realiza um excelente trabalho nesse curso de mestrado, contribuindo na formação acadêmica e profissional de várias pessoas.

“Por vezes sentimos que aquilo que fazemos não é senão uma gota de água no mar. Mas o mar seria menor se lhe faltasse uma gota”. (Madre Teresa de Calcutá)

## RESUMO

### METAHEURÍSTICAS ALGORÍTMOS GENÉTICOS E GRASP APLICADAS AO POSICIONAMENTO DE TORRES DE TRANSMISSÃO DE SINAL DE INTERNET

O presente estudo trata da aplicação de Metaheurísticas à problemas de localização de torres de transmissão do sinal de internet, com o objetivo de encontrar o posicionamento ideal para estas, tendo como resultado a redução dos custos de um projeto de cidades digitais aliada a melhor qualidade da transmissão do sinal. Para tanto, foi realizada inicialmente uma pesquisa bibliométrica acerca do tema proposto obtendo o grau de interesse dos pesquisadores pelo assunto. Em seguida, foi proposta a utilização de duas heurísticas baseadas nas Metaheurísticas Algoritmos Genéticos e GRASP, a fim de verificar a que melhor se aplica à resolução do problema. A heurística baseada em Algoritmo Genético apresentou como resultado cobertura de 88% das demandas, enquanto a heurística baseada em GRASP chegou a 92% de cobertura, apresentando uma leve vantagem a sua utilização. Os resultados demonstram a importância da pesquisa e seu emprego a diversos segmentos da sociedade. A integração destes resultados com o Google Maps apresenta uma forma visual para análise dos resultados, trazendo ganhos significativos para novos projetos.

**PALAVRAS-CHAVE:** AG. GRASP. Metaheurísticas. PLMC.

## ABSTRACT

### GENETIC ALGORITHMS AND GRASP METAHEURISTICS APPLIED TO THE POSITIONING OF TOWERS OF INTERNAL SIGNAL TRANSMISSION

The present study deals with the application of metaheuristics to the problems of locating towers of transmission of the internet signal, with the objective of finding the ideal position for them, resulting in the reduction of the costs of a digital cities project together with the best quality of the transmission of the signal. In order to do so, a bibliometric research was initially carried out on the proposed topic, obtaining the degree of interest of the researchers by the subject. Then, it was proposed the use of two heuristics based on the Genetic Algorithms and GRASP Metaheuristic, in order to verify the one that best applies to the resolution of the problem. And the comparison of performance between them. The heuristic based on Genetic Algorithm presented a coverage of 88% of the demands, whereas the heuristic based on GRASP reached 92% of coverage, presenting a slight advantage to its use. The results demonstrate the importance of research and its employment to diverse segments of society. Integrating these results with Google Maps presents a visual way to analyze the results, bringing significant gains to new projects.

**KEYWORDS:** AG. GRASP. Metaheurísticas. PLMC.

## LISTA DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Figura 1 – Simulação da representação visual do resultado.....                           | 19 |
| Figura 2 - Exemplo de PLMC aplicado a distribuição de sinal de internet.....             | 27 |
| Figura 3 - Algoritmo Genético e suas fases .....   | 28 |
| Figura 4 - Pseudo-código GRASP.....  | 29 |
| Figura 5 - Documentos por ano de publicação.....   | 31 |
| Figura 6 – Documentos por autor.....   | 31 |
| Figura 7 - Documentos por país de origem. ....   | 32 |
| Figura 8 - Áreas de interesse. Fonte: .....  | 33 |
| Figura 9 – Visada direta .....   | 41 |
| Figura 10 - Exemplo da configuração de um PLMC.....                                      | 42 |
| Figura 11 - Evolution Program proposto por Holland (1975). ....                          | 43 |
| Figura 12 - Exemplo de localidades marcadas no Google Maps .....                         | 46 |
| Figura 13 - Fluxograma do AG.....  | 47 |
| Figura 14 - Formato de cromossomo com seus genes. ....                                   | 48 |
| Figura 15 - Exemplo de cruzamento de 1 ponto de corte.....                               | 48 |
| Figura 16 - Exemplo de Mutação de 1 (um) gene .....                                      | 49 |
| Figura 17 - AG aplicado sem elitismo.....  | 49 |
| Figura 18 - Melhor solução sem aplicação de elitismo.....                                | 50 |
| Figura 19 - Melhor solução utilizando AG com elitismo.....                               | 51 |
| Figura 20 - Melhor solução encontrada com elitismo. ....                                 | 52 |
| Figura 21 - Comparativo da melhor solução com e sem elitismo .....                       | 53 |
| Figura 22 - Conceito de cidades inteligentes.....  | 59 |
| Figura 23 - Exemplo de configuração do PLMC.....   | 62 |
| Figura 24 - Pseudo-código GRASP.....   | 62 |
| Figura 25 - Pseudo-código GRASP - fase de construção. ....                               | 63 |
| Figura 26 - Fase de busca local GRASP.....   | 63 |
| Figura 27 - API Google Maps aplicada na visualização de uma solução encontrada.<br>..... | 65 |
| Figura 28 - Evolução das soluções obtidas na fase de busca local. ....                   | 66 |
| Figura 29 - Número de soluções Pareto-ótimas.....  | 67 |
| Figura 30 - Área de Cobertura da melhor solução encontrada.....                          | 67 |

## LISTA DE TABELAS

|  |    |
|--|----|
| Tabela 1 - Exemplo da matriz de distâncias.....          | 46 |
| Tabela 2 - Parâmetros utilizados no AG sem elitismo..... | 50 |
| Tabela 3 - Matriz de capacidades.....                    | 65 |
| Tabela 4 - Parâmetros utilizados nos testes.....         | 66 |

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

|            |   |
|------------|---|
| AG         | Algoritmo Genético                                    |
| ANSI       | <i>American National Standards Institute</i>          |
| API        | <i>Application Program Interface</i>                  |
| Backbones  | Rede de transporte de maior capacidade                |
| CFTV       | Circuito Fechado de Televisão                         |
| EP         | <i>Evolution Program</i>                              |
| FA         | Função de aptidão em AGs                              |
| FRONT-END  | Etapa inicial de um processo                          |
| GRASP      | <i>Greedy Randomized Adaptative Search Procedure</i>  |
| HLA        | Heurística de Locação e Alocação                      |
| IC         | Inteligência Computacional                            |
| IDE        | <i>Integrated Development Environment</i>             |
| IEC        | <i>International Electrotechnical Commission</i>      |
| IEEE       | Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos   |
| ISO        | <i>International Organization for Standardization</i> |
| ISP        | <i>Internet Service Provider</i>                      |
| LAN        | <i>Local Area Network</i>                             |
| MAN        | <i>Metropolitan Area Network</i>                      |
| NBR        | Norma Brasileira OG - Operador Genético               |
| NP-DIFICIL | Classe atribuída a problemas complexos                |
| PO         | Pesquisa Operacional                                  |
| PPM        | Problema das P-Medianas                               |
| PLMC       | Problema de Localização de Máxima Cobertura           |
| TIA        | <i>Telecommunications Industries Association</i>      |
| TIC        | Tecnologia da Informação e Comunicação                |
| UPP        | Unidade de Polícia Pacificadora                       |
| UTP        | <i>Unshielded Twisted Pair</i>                        |
| VNS        | <i>Variable Neighborhood Search</i>                   |
| WAN        | <i>Wide Area Network</i>                              |
| WEB        | Sistema hipertextual através da internet              |
| WEB-BASED  | Sistemas desenvolvidos para plataforma WEB            |

WLAN

*Wireless Local Area Network*

## Sumário

|   |    |
|---|----|
| FICHA CATALOGRÁFICA .....   | 3  |
| 1 INTRODUÇÃO GERAL .....  | 16 |
| 1.1 Contextualização .....  | 16 |
| 1.2 Objetivos .....   | 17 |
| 1.3 Justificativa .....   | 18 |
| 1.4 Delimitação do problema.....  | 19 |
| 1.5 Estrutura da pesquisa.....  | 19 |
| 2 METODOLOGIA .....   | 21 |
| 2.1 Classificação da pesquisa.....  | 21 |
| 2.2 Procedimentos técnicos e técnicas de análise .....  | 22 |
| 2.3 Trabalhos correlatos .....  | 23 |
| 3 ARTIGO A – Análise bibliométrica da produção científica sobre problemas de localização utilizando as metaheurísticas Algoritmos Genéticos e GRASP ..... | 24 |
| 3.1 Introdução.....   | 24 |
| 3.2 Referencial Teórico .....   | 26 |
| 3.2.1 Problemas de Localização de Máxima Cobertura (PLMC).....  | 26 |
| 3.2.2 Algoritmos genéticos.....   | 27 |
| 3.2.3 Metaheurística GRASP.....   | 28 |
| 3.3 Metodologia.....  | 29 |
| 3.4 Análise e discussão dos resultados .....  | 30 |
| 3.5 Considerações finais.....   | 33 |
| 3.6 Referências bibliográficas .....  | 34 |
| 4 ARTIGO B – ALGORITMO GENÉTICO APLICADO A PROBLEMAS DE ALOCAÇÃO DE TORRES DE RADIO TRANSMISSÃO.....  | 37 |
| 4.1 Introdução.....   | 38 |
| 4.2 Referencial teórico.....  | 39 |
| 4.2.1 Antenas .....   | 40 |
| 4.2.2 Problemas de Localização .....  | 41 |
| 4.2.3 Algoritmos Genéticos.....   | 43 |
| 4.3 Metodologia.....  | 44 |
| 4.4 Resultados.....   | 49 |

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 4.5   | Conclusões.....   | 53 |
| 4.6   | Referências Bibliográficas.....   | 54 |
| 5     | ARTIGO C – META HEURISTICA GRASP PARA O PROBLEMA DE<br>POSICIONAMENTO DE TORRES DE DISTRIBUIÇÃO DE SINAL DE INTERNET..... | 57 |
| 5.1   | Introdução.....   | 58 |
| 5.2   | Problemas de localização .....  | 60 |
| 5.2.1 | Problemas de localização de torres transmissão para sinal de internet (WLAN) .  | 60 |
| 5.2.2 | PLMC.....   | 61 |
| 5.3   | Metaheurística GRASP.....   | 62 |
| 5.4   | Testes computacionais .....   | 64 |
| 5.5   | Resultados.....   | 65 |
| 5.6   | Conclusões.....   | 68 |
| 5.7   | Referências Bibliográficas.....   | 68 |
| 6     | Considerações finais.....   | 71 |
|       | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....  | 72 |

# 1 INTRODUÇÃO GERAL

## 1.1 Contextualização

A evolução do ambiente de computação corporativa sinaliza para novos tempos nas organizações, onde mobilidade e computação em nuvem são tendências inquestionáveis. No setor público não é diferente, mesmo com investimentos limitados, e diante da atual crise financeira enfrentada pelos estados, ainda assim, fica claramente perceptível o avanço das Tecnologias da Informação e Comunicação (TICs) neste setor. Mais especificamente, para os municípios, tais avanços tecnológicos apresentam um canal de comunicação permanente com o cidadão, possibilitando a disponibilização de vários serviços digitais como: matrícula *online*, marcação de consultas, acompanhamento de processos, extrato de dívida ativa, emissão de 2ª vias de alvarás e taxas, solicitação de vários outros serviços através da ouvidoria do município. Este conjunto de ferramentas, compostas por hardware, software e redes de comunicação de dados, vem transformando a maneira como o cidadão se relaciona com as esferas do poder público. Seja no cenário brasileiro ou internacional, esta é uma tendência mundial.

Neste contexto, as redes de comunicação de dados tornam-se imprescindíveis para a oferta de serviços, pois através delas o poder público e os cidadãos trocam informações a fim de solucionar um determinado problema de forma virtual ou remota. Tanenbaum (2011) afirma que a comunicação provida pelos *backbones* estendem as funcionalidades das Redes Locais (LAN), criando e mantendo o que conhecemos por “internet” ou rede mundial de computadores.

Para criar a infraestrutura necessária à prestação de tais serviços fazem necessárias duas abordagens: a primeira mais simples, que é a interconexão do órgão público à internet através da compra de acesso IP; já a segunda, um pouco mais complexa, é investir na infraestrutura interna e na distribuição de sinal na área geográfica da região a ser atendida. Neste cenário, o DATACENTER pode ser

considerado a parte interna da infraestrutura, sendo este um abrigo protegido e seguro para o armazenamento dos elementos de rede, ativos e passivos, como: servidores, *switches*, *patch panels*, roteadores, *storages* e demais dispositivos componentes. Enquanto que as redes de comunicação de dados, formadas por ramais de fibra ópticas e enlaces de rádio frequência, podem ser vistas como a parte *outdoor* da infraestrutura.

Segundo Bartel, Ichniowski e Shaw (2005), os investimentos realizados em TIC traduzem diretamente na melhoria do processo produtivo das organizações, aumentando sua eficiência e competitividade. Epstein e Rejc (2005) corroboram, afirmando que as TICs auxiliam as organizações de várias formas, entre elas:

- a. aumentando a produtividade e sua capacidade de operação;
- b. reduzindo o tempo necessário para a realização das atividades;
- c. melhorando a qualidade e o desempenho organizacional; e
- d. reduzindo custos de operação e manutenção e qualificando os principais indicadores.

Embora ainda seja comum a utilização de métodos empíricos na resolução de problemas de localização, a aplicação de métodos científicos, através da construção de algoritmos baseados em heurísticas, tem provado sua eficácia no tratamento deste tipo de problema. Como exemplo, este estudo explora a utilização de heurísticas no posicionamento de torres de sinal de internet, provando sua contribuição para uma distribuição racional dos recursos e maior eficiência do sistema.

## **1.2 Objetivos**

O objetivo geral deste trabalho é definir o melhor posicionamento para instalação de antenas de transmissão de sinal de internet para o projeto “Cachoeiro Digital” no município de Cachoeiro de Itapemirim - ES.

Para atender ao objetivo geral da pesquisa, foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- Realizar um estudo bibliométrico de publicações sobre Problema de Localização de Máxima Cobertura (PLMC) associados às heurísticas utilizadas Algoritmo Genéticos (AG) e *Greedy Randomized Adaptive Search Procedure* (GRASP);
- Desenvolver o Problema de Localização de Máxima Cobertura (PLMC) utilizando a meta heurística GRASP;
- Desenvolver o Problema de Localização de Máxima Cobertura (PLMC) utilizando a meta heurística Algoritmo Genético;
- Desenvolver uma aplicação WEB integrado ao Google Maps, para demonstração visual dos resultados, utilizando o mapa da cidade em estudo;
- Comparar os resultados obtidos com cada heurística a fim de se eleger o método apropriado ao problema.

### 1.3 Justificativa

Diante da necessidade de expansão da rede de comunicação de dados do município de Cachoeiro de Itapemirim - ES, este trabalho buscou apresentar um método científico para tratamento do problema, que atendesse às questões técnicas e também financeiras, visto que um posicionamento eficiente reduz o quantitativo de materiais empregados na solução, reduzindo o custo total do projeto, tornando viável sua execução.

Os algoritmos a serem desenvolvidos também propiciaram conhecer com antecedência o local de instalação das facilidades, visualizando seu posicionamento e área de cobertura no mapa. Para o gerente de infraestrutura local, isto é essencial, pois reduz tempo e custos, com excessivos testes de cobertura de sinal, além de fornecer um mapa completo da situação, conforme Figura 1.

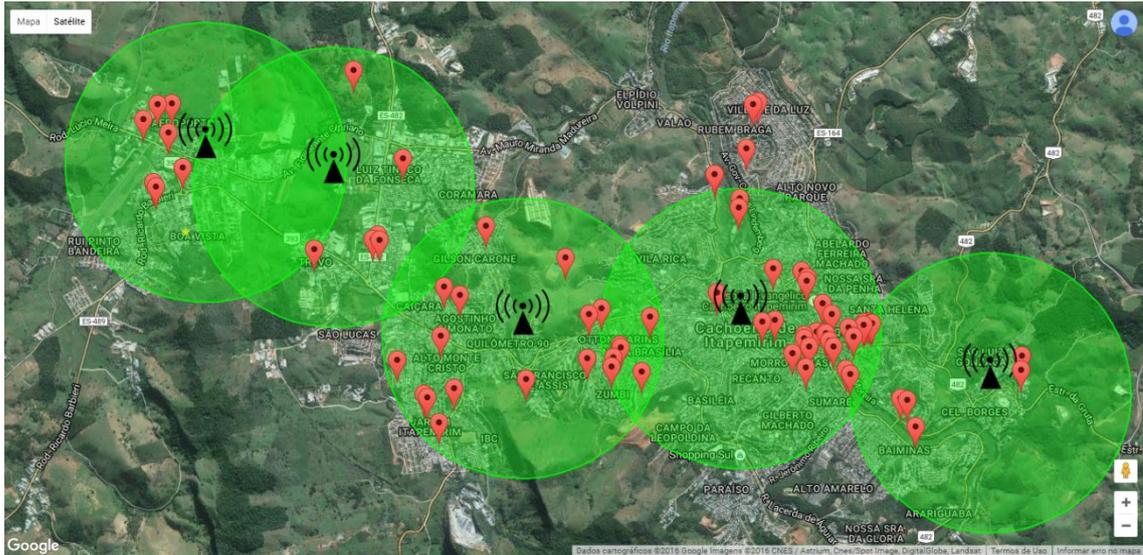


Figura 1 – Simulação da representação visual do resultado.

Fonte: Próprio autor.

#### 1.4 Delimitação do problema

Esta pesquisa foi realizada na região metropolitana do município de Cachoeiro de Itapemirim-ES, localizado na região sul do estado do Espírito Santo. Foi objeto de estudo desta pesquisa a alocação, de forma otimizada, das antenas de distribuição de sinal de internet que compõem o projeto “Cachoeiro Digital”.

#### 1.5 Estrutura da pesquisa

A presente dissertação está organizada em forma de três artigos científicos. Cada um destes artigos possui – de forma independente – os conteúdos fundamentais de uma publicação científica, tais como resumo, *abstract*, introdução (com contextualização, situação-problema e objetivos), revisão de literatura, metodologia, resultados e discussão, bem como conclusão e as devidas referências bibliográficas.

O Capítulo 1 contém a Introdução Geral, com a contextualização do tema, a delimitação do problema, a apresentação dos objetivos e a justificativa do estudo.

O Capítulo 2 se referente à Metodologia, classificando a pesquisa conforme a literatura, descrevendo as etapas do desenvolvimento da pesquisa e apresentado os trabalhos relacionados.

O Capítulo 3 é referente ao Artigo 1, que contém um estudo bibliométrico nos temas da pesquisa que estarão associados no estudo de caso: PLMC, e as heurísticas AG e GRASP.

O Capítulo 4 é referente ao Artigo 2, que trata da proposta de aplicação da heurística AG na resolução do PLMC.

O Capítulo 5 é referente ao Artigo 3, que trata da proposta de aplicação da heurística GRASP na resolução do PLMC.

O Capítulo 6 aborda as considerações finais do pesquisador, verificando se a pesquisa atingiu o objetivo proposto.

Por último, ao final do trabalho, estão inseridas as referências bibliográficas.

## **2 METODOLOGIA**

Neste capítulo estão descritos a classificação da pesquisa, a descrição da literatura, os procedimentos técnicos e de análise e os trabalhos correlatos.

### **2.1 Classificação da pesquisa**

Diferentes autores têm apresentado diferentes formas de classificações para as pesquisas. Segundo Mattar (1997), isto ocorre devido ao fato de que uma pesquisa representa um conceito complexo que não pode ser descrito de maneira única. Para Gil (2000), a classificação de uma pesquisa é obtida através do estabelecimento de critérios, sendo que entre os mais comuns pode-se citar: natureza, abordagem, objetivo e procedimentos técnicos.

Do ponto de vista da natureza, esta pesquisa pode ser considerada aplicada, pois apresenta como característica principal a aplicação dos conhecimentos adquiridos e a utilização prática destes na resolução de um problema real. De acordo com Barros e Lehfeld (2000), a pesquisa aplicada tem como motivação a necessidade de produzir conhecimento para a aplicação de seus resultados, com o objetivo de contribuir para fins práticos, visando a solução mais ou menos imediata do problema real.

Do ponto de vista da abordagem, esta pesquisa pode ser considerada combinada entre qualitativa e quantitativa por apresentar aspectos das duas metodologias. Na pesquisa qualitativa, o objetivo é conseguir compreender o comportamento de determinado grupo-alvo, pois ela foca no caráter subjetivo do objeto investigado, estudando suas particularidades e experiências individuais. Já a pesquisa quantitativa visa obter referências numéricas, valores, que traduzam as preferências e comportamentos de um grupo investigado (GIL, 2000).

Do ponto de vista de seus objetivos, a presente pesquisa pode ser classificada como exploratória, pois busca proporcionar uma visão geral acerca de determinado fato, proporcionando maior familiaridade com o objeto de estudo. Neste tipo de

abordagem é desencadeado um processo de investigação que auxilia o pesquisador no aprimoramento da formulação do problema ou hipótese (KÖCHE, 1997).

Do ponto de vista dos procedimentos técnicos, esta pesquisa pode ser classificada como um estudo de caso, por tentar estudar um fenômeno amplo e complexo que não pode ser estudado fora de seu contexto real. Conforme Yin (2001), o estudo de caso é uma estratégia de pesquisa que compreende um método que abrange tudo em abordagens específicas de coletas e análise de dados.

## **2.2 Procedimentos técnicos e técnicas de análise**

A referida pesquisa tem início na investigação bibliográfica acerca do tema proposto, na tentativa de identificar como pesquisadores têm trabalhado em problemas de localização de facilidades. Como resultado desta investigação, foi observado o emprego de várias Metaheurísticas como GRASP, AG, Busca Tabu, *Simulated Annealing*, *Hill Climbing*, Colônia de formigas, entre outras.

Em seguida, foi realizado um estudo bibliométrico nos temas centrais – PLMC, GRASP e AG, a fim de mensurar a importância da pesquisa, mediante o relevante número de publicações acerca do tema. Nesta etapa, foi observada a quantidade de publicações por ano, por autor, por país, por tipo de publicação.

Como problema de localização, foi escolhido o PLMC devido ao fato do mesmo não se preocupar com a cobertura total das demandas, tendo em vista que o posicionamento de torres de transmissão para sinal de internet tem limitação no raio de cobertura. No caso de utilização de uma heurística de localização capacitada, o número máximo de facilidades não seria conhecido.

Por final, os resultados obtidos com a aplicação destas heurísticas foram colocados à prova em um ambiente simulado utilizando a ferramenta Google Maps, conforme consta nos artigos inseridos neste trabalho. Todas as referências foram citadas dando os devidos créditos aos autores.

### 2.3 Trabalhos correlatos

Após uma pesquisa inicial sobre trabalhos correlatos a esta proposta de dissertação, foram selecionados três trabalhos que são descritos resumidamente a seguir.

Siliprande (2009) utilizou um modelo de programação linear multi-objetivo para localização de antenas transmissoras de sinal de internet no município de Itaperuna-RJ. O modelo desenvolvido baseado no PLMC visa resolver o problema enfrentado pela maioria dos provedores de serviços de internet que é o posicionamento eficiente das torres de transmissão.

Vianna et al. (2012) propuseram a utilização das heurísticas GRASP e PLMC para resolver o problema de localização de pontos de acesso em uma rede sem fio *indoor* visando cobrir a maior área possível de atendimento para uma determinada quantidade de usuários, utilizando duas abordagens diferentes, GRASP-TROCA e GRASP-DROP, conforme explicado em seu trabalho. Os resultados obtidos foram considerados satisfatórios, apresentando cobertura superior a 80% da área.

Caldas (2013) apresentaram uma proposta de utilização de Algoritmo Genético para posicionamento de racks de cabeamento estruturado em uma instituição de ensino, e concluíram aplicação da heurística eficiente tendo em vista a economia gerada com economia de cabos, devido ao melhor posicionamento dos racks.

### **3 ARTIGO A – Análise bibliométrica da produção científica sobre problemas de localização utilizando as metaheurísticas Algoritmos Genéticos e GRASP**

#### **Resumo**

O objetivo deste artigo é a identificação e análise das principais características do perfil da produção científica sobre problemas de localização de máxima cobertura (PLMC) utilizando as metaheurísticas Algoritmos Genéticos (AG) e GRASP. Para tanto, realizou-se uma pesquisa descritiva e quantitativa na base Scopus, utilizando um filtro baseado nas metaheurísticas *Genetic Algorithms (AG)* e *Greedy Randomized Adaptive Search Procedure (GRASP)*, retornando os últimos 10 (dez) anos de publicações do tema proposto. A busca retornou 295 (duzentos e noventa e cinco) artigos, representando uma média de 30 (trinta) publicações/ano. O Brasil aparece entre os países que mais publicam nesta área com 12 (doze) artigos publicados.

**Palavras-chave:** AG. GRASP. PLMC.

#### **Abstract**

The purpose of this article is to identify and analyze the main characteristics of the profile of the scientific production on maximum coverage localization problems (PLMC) using the Metaheuristic Genetic Algorithms (GA) and GRASP. For this, a descriptive and quantitative research was carried out in the Scopus database, using a filter based on the metaheuristics Genetic Algorithms (AG) and Greedy Randomized Adaptive Search Procedure (GRASP), returning the last 10 (ten) years of publications of the proposed theme. The search returned 295 (two hundred and ninety-five) articles, representing an average of 30 (thirty) publications / year. Brazil is among the countries that publish the most in this area with 12 (twelve) published articles.

**Keywords:** GA. GRASP. MCLP.

#### **3.1 Introdução**

Em um PLMC (problema de localização de máxima cobertura), deseja-se conhecer onde serão instaladas facilidades (torres, fábricas, depósitos, hospitais, escolas, etc.), para atender de forma otimizada um conjunto de demandas, dentro de uma determinada métrica, geralmente distância ou tempo (ARAKAKI; LORENA, 2006). Para atender tal procura, a área solicitante será considerada coberta caso esteja dentro da distância de serviço de alguma facilidade. Segundo Church e ReVelle (1974), o objetivo do PLMC é atender ao máximo de demandas possíveis com uma quantidade limitada de facilidades, onde a escolha do melhor local para instalação da facilidade é o fator determinante que esta otimização de recursos ocorra. Devido sua importância no auxílio a uma alta variedade de problemas de localização, seu estudo vem sendo aprofundado pela comunidade científica, existindo uma extensa literatura a respeito (BRANDEAU; CHIU, 1989).

O PLMC atende a uma vasta gama de aplicações, conforme abaixo:

- Localização de escolas (PIZZOLATO *et al.*, 1997);
- Otimização de Antenas de telecomunicação (LORENA; PEREIRA, 2002);
- Planejamento de rede de ambulâncias (Adenso-Diaz e Rodriguez, 1997);
- Localização de sirenes de emergência (Current e O’Kelly, 1992);
- Localização de Facilidades no setor público (FILHO *et al.*, 2012);
- Dentre outras.

A busca pela localização ideal para instalação de pontos de facilidade é um trabalho comum para um problema com baixo número de demandas. Porém, em problemas com alto grau de complexidade, com número de demandas elevado, torna-se necessária a utilização de métodos baseados em heurísticas e metaheurísticas em sua resolução.

As metaheurísticas AG (Algoritmo Genéticos) e GRASP (Greedy Randomized Adaptive Search Procedure) se destacam na resolução de problemas de localização de facilidades. Vários pesquisadores têm mostrado interesse ao longo dos anos em trabalhar com estas metaheurísticas, conforme aponta o resultado desta pesquisa. A popularidade traz como benefício um vasto material de pesquisa na internet,

facilitando o desenvolvimento de novos trabalhos. Ambas apresentam baixo grau de complexidade, facilidade na implementação de código para algoritmos e desempenho satisfatório na resolução do PLMC.

Assim, para buscar o conhecimento sobre problemas de PLMC utilizando as metaheurísticas AG e GRASP, especificamente, realizou-se uma pesquisa descritiva e quantitativa na base *Scopus* como fonte inicial da pesquisa, desenvolvendo-se uma análise de estudo bibliométrico, explicada por Pao (1989), como um termo usado para denotar a área de estudo que usa métodos matemáticos e estatísticos para investigar e quantificar os processos de comunicação escrita.

## **3.2 Referencial Teórico**

### **3.2.1 Problemas de Localização de Máxima Cobertura (PLMC)**

A Pesquisa Operacional (PO) é um método científico aplicado a problemas complexos de forma a auxiliar o processo de tomada de decisão com a otimização de recursos (HILLIER; LIEBERMAN, 2013). Dentre as aplicações de PO está o PLMC, cujo objetivo é definir o melhor local para instalar facilidades, considerando que os clientes a serem atendidos estão sujeitos a restrições, tais como: distância, tempo e recursos escassos. O problema de localização de facilidades tem despertado interesse das empresas que, no competitivo mercado globalizado, buscam obter vantagens estratégicas, reduzindo custos de produção, transporte, armazenagem entre outros e conseqüentemente tornando-a mais competitiva que seus concorrentes. Neste contexto, segundo Arroyo et al. (2006), o problema de localização de facilidades pode ser visto como uma subárea da Logística, que trata do planejamento, organização e controle de tarefas de armazenagem, transporte e distribuição de bens e serviços, como redes de transportes, de distribuição e redes de Telecomunicações. A Figura 2 ilustra um exemplo de PLMC aplicado a distribuição de sinal de internet.

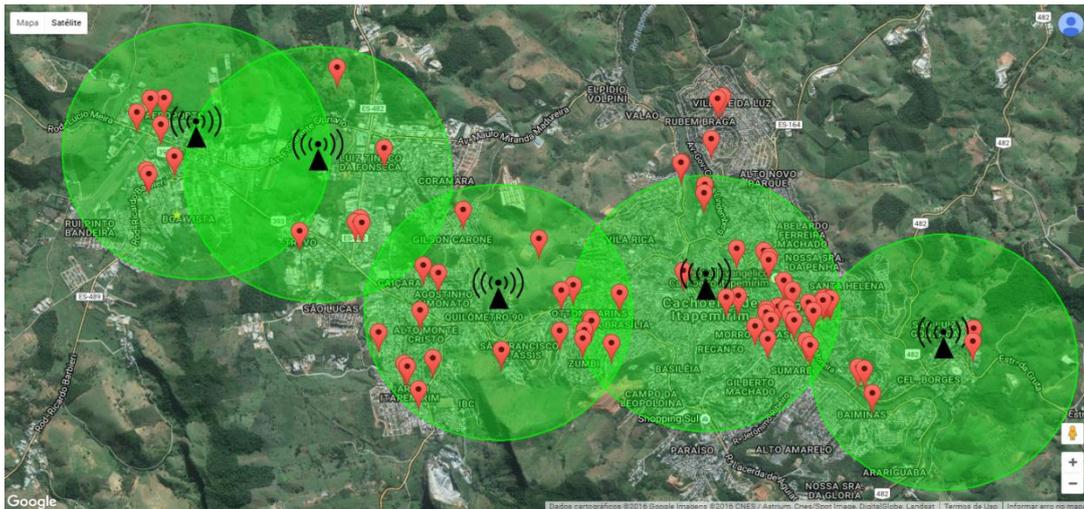


Figura 2 - Exemplo de PLMC aplicado a distribuição de sinal de internet.

Fonte: Próprio autor.

### 3.2.2 Algoritmos genéticos

Os Algoritmos Genéticos tiveram seus princípios desenvolvidos por John Holland, em 1975, e trata-se de uma heurística de otimização inspirada na evolução biológica. Neste algoritmo, indivíduos competem entre si pela sobrevivência, evoluindo através de gerações. Cada indivíduo tem um grau de aptidão e espera-se que os mais aptos sobrevivam, propagando seu código genético (MOORI; KIMURA; ASAKURA, 2010).

O mecanismo de seleção natural dos AG's está baseado na sua aptidão, para tanto cada indivíduo é representado por um cromossomo que irá determinar a função de aptidão (FA) deste indivíduo. O cromossomo é uma codificação das características do indivíduo, ou seja, uma solução de um problema num espaço de busca. A codificação mais simples utilizada é a codificação binária, mesmo quando as variáveis do problema são inteiras ou reais. A motivação para o uso de codificação binária vem da teoria dos esquemas (schemata theory) (HOLLAND, 1975; 1992).

Os Algoritmos Genéticos são divididos em organismos e populações. A partir de determinado problema, o algoritmo, através da criação e manipulação de um conjunto de organismos, tenta encontrar uma solução a partir da seleção dos

indivíduos e seu cruzamento. Os organismos ou estruturas representam soluções em potencial do especificado problema. O referido conjunto de organismos acima recebe o nome de população, e cada organismo desta é definido como um cromossomo. O algoritmo genético representa cada possível solução “x” no espaço de busca como uma sequência de símbolos “s” gerados a partir de um dado alfabeto finito  $A$ . A Figura 3 representa um exemplo simplificado do processo de seleção e mutação de indivíduos de dada população. No processo de “seleção”, indivíduos escolhidos sobre determinado critério, são destinados ao processo de “cruzamento”, de acordo com a taxa de cruzamento. Nesta fase dois indivíduos classificados como “Pais”, dão origem novos filhos, que sofrerão mutação em seu código genético, conforme a taxa de mutação estipulada no problema. Após estes processos, os indivíduos começam a formar uma nova população dando origem a um novo ciclo. O critério de parada, pode ser tempo de processamento ou número de iterações.

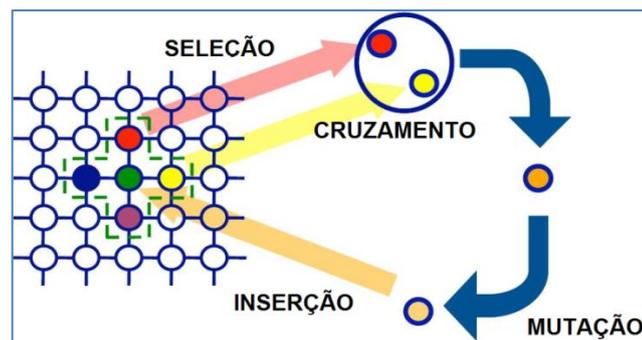


Figura 3 - Algoritmo Genético e suas fases.

Fonte: Adaptado de

<http://autoaprendi.webcindario.com/Tipo%20de%20Aprendizaje%20automatico.htm>.

### 3.2.3 Metaheurística GRASP

A metaheurística GRASP (*Greedy Randomized Adaptive Search Procedure*), proposta por Feo e Resende (1995), é uma metaheurística bastante utilizada para resolver problemas de otimização combinatória (RESENDE; RIBEIRO, 2005).

GRASP é um procedimento iterativo de múltiplos reinícios, onde a cada iteração consiste de duas fases: uma fase de construção para determinar uma solução inicial  $x$  e uma fase de busca local aplicada para melhorar a solução inicial  $x$  e obtendo uma solução ótima local  $x'$ . A cada iteração, uma função gulosa avalia a qualidade do candidato para a construção da solução. Após este processo é construída a RCL (lista restrita de candidatos) contendo os elementos com melhor valor na função gulosa. Um elemento da lista é escolhido aleatoriamente para ser inserido na solução. Este misto entre função gulosa e decisão aleatória torna o GRASP semi-guloso. Após executar um número máximo de iterações, a metaheurística retorna a melhor solução encontrada. Na Figura 4 é apresentado o pseudocódigo básico do procedimento GRASP.

```
procedure GRASP(Max_Iterations, Seed)
1   Read_Input();
2   for k = 1, ..., Max_Iterations do
3       Solution <- Greedy_Randomized_Construction(Seed);
4       Solution <- Local_Search(Solution);
5       Update_Solution(Solution, Best_Solution);
6   end;
7   return Solution;
end GRASP.
```

Figura 4 - Pseudo-código GRASP.  
Fonte: Próprio autor.

### 3.3 Metodologia

Segundo Marconi e Lakatos (2003), estudo bibliométrico é o levantamento de toda a produção bibliográfica já publicada sobre determinado tema, principalmente em livros, revistas, e demais tipos de publicações, com o objetivo de pesquisar e colocar o leitor em contato direto com materiais escrito sobre o assunto.

Marconi e Lakatos (2003) também afirmam que pesquisa documental é aquela que trata de materiais que ainda não sofreram tratamentos, ou seja, são as fontes primárias de pesquisas. Esta forma de pesquisa vale-se de materiais que não receberam ainda um tratamento analítico, ou que ainda podem ser reelaborados de acordo com os objetos da pesquisa, explica Gil (2000).

Já a pesquisa descritiva visa descrever as características de determinadas populações ou fenômenos. Uma de suas peculiaridades está na utilização de técnicas padronizadas de coleta de dados, tais como o questionário e a observação sistemática (GIL, 2000). Para Oliveira (1999), a pesquisa descritiva trata de aspectos gerais e amplos de um contexto social, desenvolvendo uma análise que identifique as diferentes formas dos fenômenos.

A amostra da pesquisa foi obtida considerando artigos científicos de áreas diversas, sobre o tema proposto, limitado aos 10 (dez) últimos anos de publicação, como objetivo de verificar a importância do tema proposto para as outras áreas de conhecimento. A pesquisa foi realizada na base Scopus utilizando o filtro de busca: ({genetic algorithms} or GRASP) and (pubyear > 2005) and ({location problems}). Foram selecionadas publicações que continham essas palavras em qualquer parte do documento, retornando 295 publicações. Os trabalhos selecionados foram tabulados e a partir deles extraídas as seguintes informações: ano de publicação, fonte, autor, país de origem e área de interesse. Conforme apresentado na Seção 3.4.

A base Scopus foi selecionada devido a seu acervo, sendo atualmente o maior banco de dados de artigos, resumos e citações da literatura científica. Lançada em 2003, atualmente conta com de 21.500 títulos de mais de 5.000 editoras internacionais, sendo uma plataforma multidisciplinar, abrangendo várias áreas do conhecimento científico (SCOPUS, 2016).

### **3.4 Análise e discussão dos resultados**

Pode-se observar na Figura 5 o número de artigos publicados por ano. Observa-se que o número de publicações vem aumentando ao longo dos anos, demonstrando que o interesse pelo tema tem se tornado cada vez mais relevante. Em 2015 temos um ápice de 37 publicações.

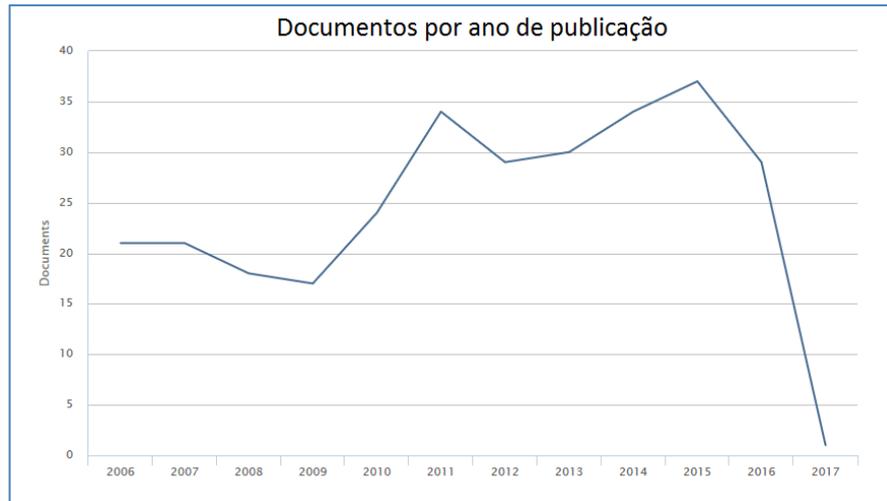


Figura 5 - Documentos por ano de publicação.  
Fonte: Próprio autor.

Na Figura 6 encontra-se o número de publicações por autor. Destaca-se o autor brasileiro, Resende M.G.C., da AT&T (*American Telephone and Telegraph*), com cinco trabalhos publicados, representando um percentual significativo em relação aos autores que mais publicaram. Também estão presentes na pesquisa, os brasileiros: Fuchshuber, R. com 2 artigos, Plastino, A. com 2 artigos, Ribeiro, G.M. também com 2 artigos e Aloise, D. com 1 artigo.

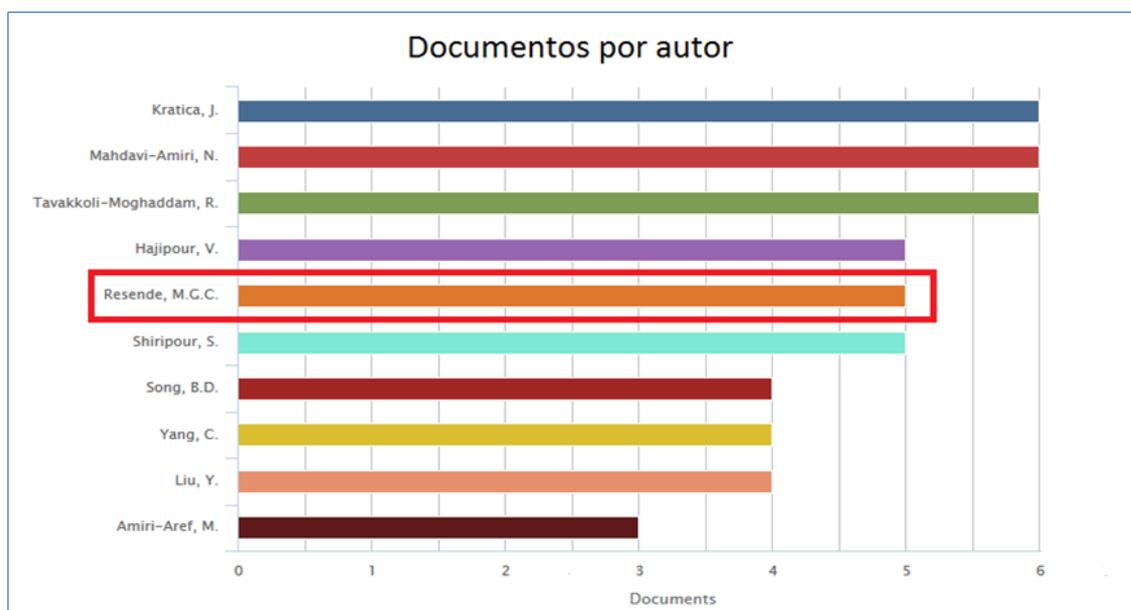


Figura 6 – Documentos por autor.  
Fonte: Próprio autor.

Na Figura 7 são analisados os países origem das publicações. O destaque vai para a China com 28% (vinte e oito) das publicações, seguida por EUA e IRÃ com 19% e 17%, respectivamente, das publicações, comprovando a força dos asiáticos na área de pesquisa científica. O Brasil aparece com 4% das publicações.

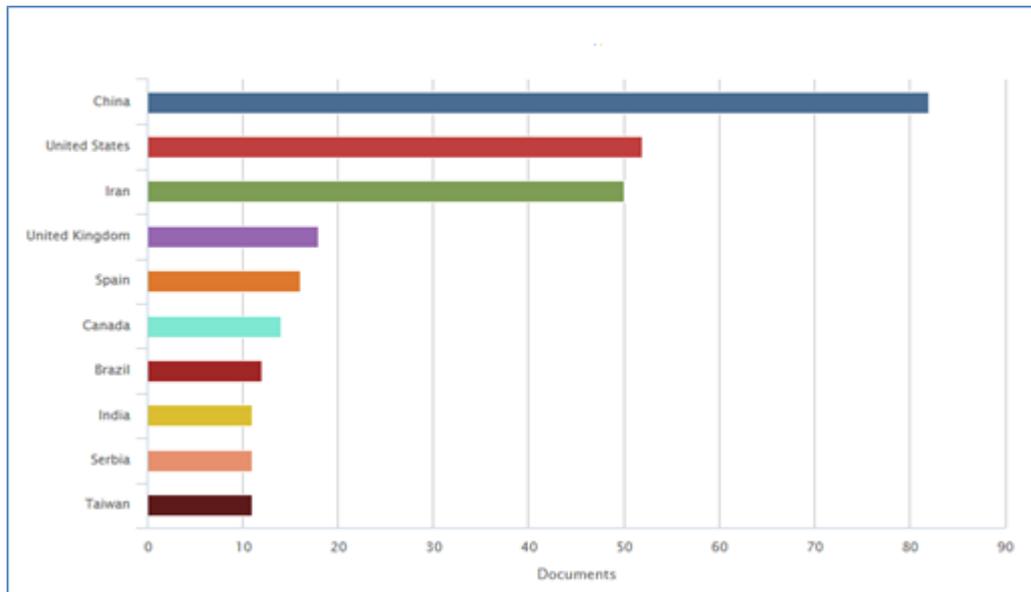


Figura 7 - Documentos por país de origem.  
Fonte: Próprio autor.

Na Figura 8 tem-se a análise das áreas de interesses, onde um documento pode estar contido em mais de uma dessas áreas, fato que eleva a frequência total de áreas a um número superior ao de artigos. Dessa forma, observa-se na figura que a área de Ciência da Computação aparece em primeiro com 56%, muito em função da codificação exigida na construção dos algoritmos. Em quarto as Ciências da decisão, com 28,5% do total das publicações.

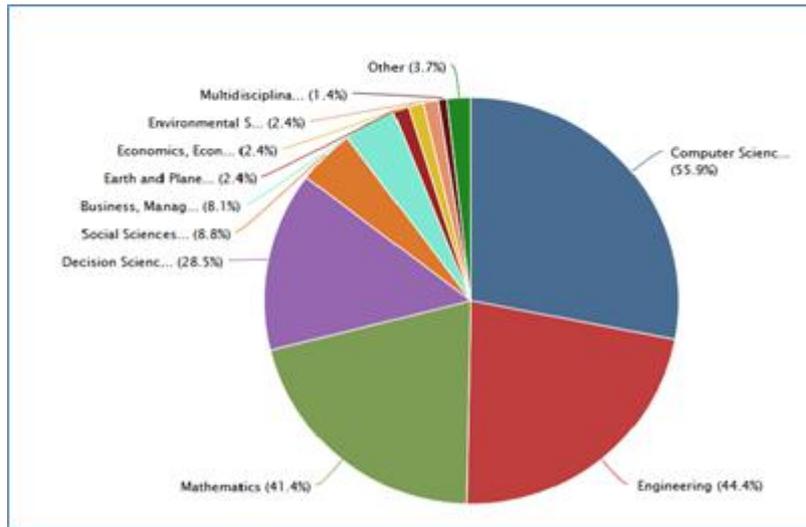


Figura 8 - Áreas de interesse.  
Fonte: Próprio autor.

### 3.5 Considerações finais

O presente trabalho teve como objetivo descrever e analisar o perfil da produção científica sobre problemas de localização de máxima cobertura (PLMC) utilizando as metaheurísticas AG e GRASP, buscando a relevância do tema pesquisado e sua contribuição ao meio acadêmico, utilizando como fonte a base Scopus.

A busca retornou 295 artigos sobre o registro dos últimos 10 anos de publicações no mundo a cerca do assunto pesquisado, apresentando destaque para pesquisadores brasileiros, com 4% do total.

O fato de ter sido utilizado somente a base de dados Scopus como fonte de pesquisa não impõe restrição aos resultados em termos de quantidades, pois a mesma é considerada uma das maiores e mais importantes fontes de publicações científicas no mundo. Porém, futuras pesquisas poderão explorar outras bases de dados a fim de verificar a relevância de demais trabalhos publicados em outras bases.

### 3.6 Referências bibliográficas

ADENSO-DIAZ, B.; RODRIGUEZ, F. A Simple search Heuristic for the MCLP: Application to the location of ambulance bases in a Rural region. **Omega, The International Journal of Management Science**, v. 25, n. 2, p. 181-187, apr. 1997.

ARAKAKI, R.G.I; LORENA, L.A.N. Uma heurística de localização-alocação (HLA) para problemas de localização de facilidades. **Revista Produção**, v. 16, n. 2, p. 319-328, Maio/Ago 2006.

ARROYO, J. E. C.; MARQUES, T. B.; CORTES, J. M. R. Um algoritmo genético para o problema de alocação de antenas de transmissão. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 26., 2006, Fortaleza. **Anais...**

BRANDEAU, M. L.; CHIU, S.S. An Overview of Representative Problems in Location Research. **Management Science**, v. 35, n. 6, p. 645-674, 1989.

CALDAS, F.W. **Aplicação de algoritmo genético para localização de rack de rede numa instalação de cabeamento estruturado em uma instituição de ensino**. Dissertação (Mestrado em Pesquisa Operacional e Inteligência Computacional) – Universidade Candido Mendes, Campos dos Goytacazes, 2013.

CARDOSO, R. L. et al. Pesquisa científica em contabilidade entre 1990 e 2003. **Revista de Administração de Empresas**, v. 45, n. 2, p. 43-55, 2005.

CHURCH, R. L.; REVELLE, C. S. Theoretical and Computational Links between the p-Median, Location Set-covering, and the Maximal Covering Location Problem. **Geographical Analysis**, v. 8, n. 4, p. 406-415, 1976.

CURRENT, J.; O'KELLY, M. Locating emergency warnings sirens. **Decision Sciences**, v. 23, n. 1, p. 221–234, jan./fev. 1992.

FEO, T.A.; RESENDE, M. G. C. Greedy randomized adaptive search procedures. **Journal of Global Optimization**, v. 6, n. 2, p. 109-133, 1995.

GIL, A. C. **Técnicas de pesquisa em economia e elaboração de monografias**. 3. ed. São Paulo: Atlas, 2000.

GOLDSCHMIDT, R. R. **Inteligência Computacional**. Rio de Janeiro: IST-Rio, p.6, 2010.

HAKAMI, S. L. Optimum Locations of Switching Centers and the Absolute Centers and Medians of a Graph. *Operations Research*, v. 12, n. 3, p. 450-459, 1964.

HILLIER, F. S.; LIEBERMAN, G. J. **Introdução à Pesquisa Operacional**. 8. ed. Porto Alegre: AMGH, p. 1-6, 2013.

HOLLAND, J. H. **Adaptation in natural and artificial systems**: An introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence. Oxford, England: U Michigan Press, 1975.

HOLLAND, J.H. **Adaptation in Natural and Artificial Systems**. 2. ed. Cambridge MA EUA: The MIT Press, 1992.

LORENA, L. A. N.; PEREIRA, M. A. A lagrangean/surrogate heuristic for the maximal covering location problem using Hillsman's edition. **International Journal of Industrial Engineering**, v. 9, n. 1, p. 57-67, 2002.

MARCONI, M. A.; LAKATOS, E. M. **Fundamentos da Metodologia Científica**. 5. ed. São Paulo: Editora Atlas, 2003.

MOORI, R. G.; KIMURA, H.; ASAKRA, O. K. Aplicação do Algoritmo Genético na Administração de Suprimentos. **Revista de Administração e Inovação**, São Paulo, v. 7, n. 2, p. 171-192, abr./jun. 2010.

PAO, M. L. Concepts of information retrieval. Englewood, Colorado: Libraries Unlimited, Inc., p. 285. 1989.

PIZZOLATO, N. D.; SILVA, H. B. F. The Location of Public Schools: Evaluation of Practical Experiences. **International Transactions in Operational Research**, v. 4, n. 1, p. 13–22, 1997.

SCOPUS, S. **Content coverage guide**. Amsterdam, Netherlands: Elsevier BV, 2016.

SILIPRANDE, M. D. **Localização de antenas de transmissão para internet wireless**: uma aplicação com abordagem genética para o município de Itaperuna. 2009. 90 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - UENF, Campos dos Goytacazes.

SOUSA FILHO, G. F et al. Uma Arquitetura e Ferramentas para Problemas de Localização de Facilidades no Setor Público. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SISTEMAS DE INFORMAÇÃO, 8., 2012, São Paulo-SP. p. 619-630, 2012.

## **4 ARTIGO B – ALGORITMO GENÉTICO APLICADO A PROBLEMAS DE ALOCAÇÃO DE TORRES DE RADIO TRANSMISSÃO**

### **RESUMO**

Este artigo explora a metaheurística Algoritmos Genéticos para resolver um problema de localização de máxima cobertura (PLMC) - projeto de cidades digitais do município de Cachoeiro de Itapemirim – ES. O problema foi modelado para maximizar a área de cobertura do sinal, melhorando o posicionamento das torres de transmissão, utilizando o menor número de facilidades possível. Para tal foi construído um algoritmo utilizando a linguagem PHP, utilizando a metaheurística AG, e a camada de visualização do Google Maps, para apresentação dos resultados. Os testes realizados apresentaram resultados satisfatórios, gerando soluções com mais de 90% de cobertura das demandas e tempos de processamento abaixo de 5min.

**PALAVRAS-CHAVE:** Algoritmos Genéticos. PLMC. Antenas.

### **ABSTRACT**

This article explores the metaheuristic Genetic Algorithms to solve a problem of location of maximum coverage (PLMC), using as a case study the project of intelligent cities of the municipality of Cachoeiro de Itapemirim - ES. The problem was modeled to maximize the area of signal coverage, improving the positioning of the transmission towers, using as few facilities as possible. For that, an algorithm was constructed using the PHP language, using the metaheuristic AG, and the visualization layer of Google Maps, to present the results. The tests performed presented satisfactory results, generating solutions with more than 90% coverage of the demands and processing times below 5min.

**KEYWORDS:** PLMC. Genetic Algorithms. Antennas.

## 4.1 Introdução

A Pesquisa Operacional é um método científico aplicado a problemas complexos de forma a auxiliar o processo de tomada de decisão com a otimização de recursos. Dentre as aplicações da Pesquisa Operacional está o Problema de Localização de Facilidades, iniciado por Alfred Weber em 1909, cujo objetivo é definir o melhor local para instalar facilidades considerando os clientes que devem ser atendidos sendo sujeitos a restrições, tais como distância, tempo e recursos escassos (HILLIER; LIEBERMAN, 2013).

Problemas de localização têm origem na otimização combinatória e pertencem à classe de problemas NP-Difícil (GAREY; JOHNSON, 1979), pois em sua maioria são considerados altamente complexos e custosos do ponto de vista computacional. Este custo é diretamente proporcional ao número de variáveis do problema que se pretende resolver. Em geral, alguma técnica heurística é empregada na solução destes problemas. O emprego de técnicas heurísticas não garante a obtenção de soluções ótimas, porém, resultados satisfatórios podem ser obtidos com tempo computacional razoável.

O problema de localização de facilidades tem despertado interesse das empresas que no competitivo mercado globalizado buscam obter vantagens estratégicas, reduzindo custos de produção, transporte, armazenagem entre outros e conseqüentemente tornando-a mais competitiva que seus concorrentes, conforme cita Arroyo, Marques e Cortes (2006). Entre as heurísticas propostas encontramos:

- *simulated annealing* (MURRAY; CHURCH, 1996);
- algoritmos genéticos (LORENA; LOPES, 1997);
- busca tabu (COSTA, 1994);
- GRASP (*Greedy Randomized Adaptive Search Procedure*) (RESENDE; WERNECK, 2004);
- VNS (*Variable Neighborhood Search*) (HANSEN; MLADENOVIC, 1997);

Quando o fator distância demanda x facilidade é determinante para a solução do problema, estes problemas são tratados como sendo Problemas de Localização de Máxima Cobertura (PLMC) (KHUMAWALA, 1973). Entre suas aplicações está o problema de alocação de antenas de transmissão, amplamente utilizado por provedores de internet e outros segmento das telecomunicações, dentre os quais pode-se citar: projeto de cidades digitais nos municípios, provedores de Internet (ISP), transmissão de rádio e televisão. O posicionamento correto das facilidades otimiza os recursos disponíveis no projeto, proporcionando eficiência nas transmissões e reduzindo custos de implantação do projeto.

O presente trabalho visa solucionar o problema de localização de torres de transmissão de sinal de internet para o projeto “Cachoeiro Digital” do município de Cachoeiro de Itapemirim – ES. As informações utilizadas neste estudo foram cedidas pela DATAI, empresa pública do município, responsável pela tecnologia da informação e comunicação, idealizadora e mantenedora do referido projeto, que possui entre suas atribuições a construção, ampliação e manutenção da rede metropolitana da cidade.

O trabalho propõe utilizar a metaheurística Algoritmos Genéticos, proposta inicialmente por Holland (1975) para resolver o problema de localização de máxima cobertura não capacitado - PLMC. Esta metaheurística tem sido proposta na resolução de problemas de otimização (LINDEN; 2008). Em problemas de localização não capacitado, não existe obrigação de atendimento a todas as demandas, limitando-se ao raio de atendimento da facilidade.

O artigo está organizado da seguinte maneira. A Seção 2 contém o referencial teórico. Na Seção 3 é apresentada a metodologia. Na Seção 4, os testes computacionais realizados. Na Seção 5, os resultados. Na última seção, encontram-se as conclusões do trabalho.

## **4.2 Referencial teórico**

### 4.2.1 Antenas

A antena é o elemento radiante que determina se a potência disponível será irradiada em todas as direções ou não, qual ângulo sobre o horizonte e qual o fator de ganho. Pode-se interpretar a antena como sendo um meio “físico imaginário” de conexão entre a torre de transmissão e os pontos de acesso finais, tendo como função a conversão de energia elétrica em eletromagnética e vice-versa. Uma antena pode ser classificada como direcional, omnidirecional ou setorial, dependendo de seu padrão de irradiação (STEVES, 1980).

Uma antena pode ser considerada como um tipo especial de linha de transmissão, a qual irradia ou capta energia. Através da frequência de uma onda é possível classificar dois tipos básicos de ondas, segundo sua propagação: ondas terrestres e ondas espaciais. As ondas terrestres se constituem dos sinais diretos entre o transmissor e o receptor, e de sinais provenientes de ondas refletidas pela terra. Já as ondas espaciais referem-se às ondas terrestres propagadas em direção ao espaço, mas refletidas pela ionosfera ou troposfera de volta à terra. Segundo Vassalo (1979), as ondas eletromagnéticas estão classificadas em quatro formas diferentes de propagação: direta, por reflexão, por difração e por refração.

Pelo fato das antenas utilizarem a frequência de 2.4Ghz e 5.8Ghz, o seu comprimento de onda é muito pequeno fazendo com que qualquer obstáculo atrapalhe em sua transmissão, necessitando-se assim, que os equipamentos de transmissão e de recepção tenham a chamada “visada direta”, que é quando não há nenhum obstáculo físico entre os equipamentos que está transmitindo e o que está recebendo os dados. A Figura 9 apresenta um esquema de visada direta, também chamado de enlace ponto a ponto, interligando dois pontos de demanda. Também é possível observar que zona de Fresnel está parcialmente obstruída, vindo a interferir na qualidade do sinal.

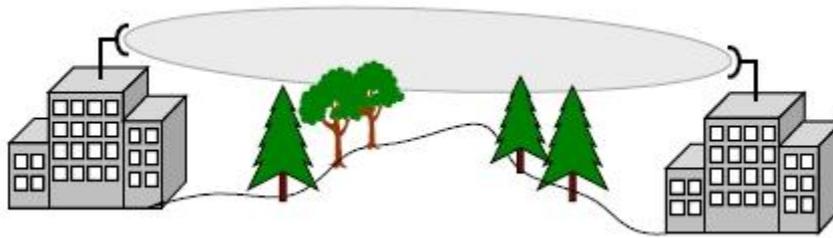


Figura 9 – Visada direta.

Fonte: <[http://juliobattisti.com.br/tutoriais/paulocfarias/redeswireless004\\_clip\\_image004.jpg](http://juliobattisti.com.br/tutoriais/paulocfarias/redeswireless004_clip_image004.jpg)>.

Vale ressaltar que as frequências escolhidas para a realização deste projeto são 2.4Ghz e 5.8Ghz, consideradas como frequências “livres” pela Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL), não havendo a necessidade de nenhum tipo de outorga para a utilização das mesmas. Estas frequências são compatíveis com os padrões IEEE 802.11A, B, G e N, tornando possível o acesso à internet através de qualquer dispositivo móvel como celulares, *tablets* e *notebooks*.

Este trabalho considera que cada torre de transmissão (facilidade) instalada tem raio de cobertura de 360° sendo consideradas onidirecionais, irradiando o sinal igualmente em todas as direções, possuindo o mesmo custo e alcance. O problema também considera que dentro do raio de cobertura estabelecido, todos os clientes têm a mesma qualidade de sinal.

#### 4.2.2 Problemas de Localização

O PLMC é um problema clássico de localização e seu objetivo é determinar os locais para instalar facilidades de modo a maximizar a de cobertura de clientes (demandas), conhecendo a relação cliente x facilidade. O objetivo do PLMC é cobrir áreas de demanda segundo as restrições de um problema. Como restrições para o PLMC pode-se citar: distância ou tempo total de uma viagem entre demanda e facilidade, e também o raio de cobertura de uma antena. Uma demanda é considerada coberta quando atendida por uma facilidade e não coberta caso a facilidade mais

próxima a ela esteja localizada a uma distância maior do que seu alcance. O PLMC não faz restrições de capacidade e não exige que todas as áreas de demanda estejam cobertas, conforme Figura 10.

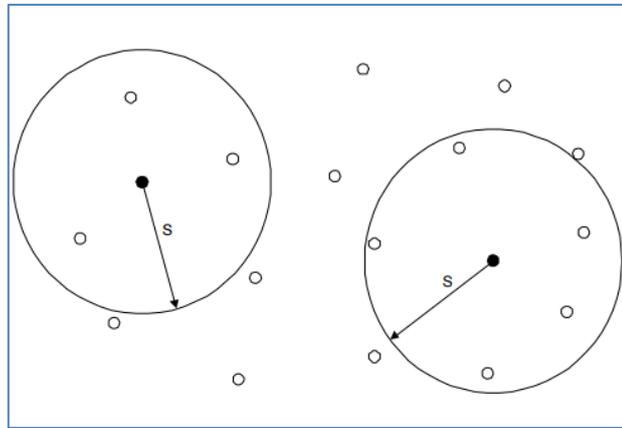


Figura 10 - Exemplo da configuração de um PLMC.  
Fonte: Próprio autor.

Na literatura encontra-se exemplos como o de Adenso-Díaz e Rodríguez (1997) onde foi proposto um problema para distribuição de número limitado de ambulâncias (facilidades), de forma que a maioria da população (demandas) fosse atendida mais rapidamente possível.

Church e Reville (1974) propôs o PLMC como uma alternativa aos o SCLP (*Set Covering Location Problem*) e ao PCP (*p-Center Problem*).

O PLMC tem grande importância prática como, por exemplo, na localização de escolas (PIZZOLATO et al., 2004) e de antenas de telecomunicação (LORENA; PEREIRA, 2002).

A busca pela localização ideal para instalação de pontos de facilidade é um trabalho comum para um problema pequeno com baixo número de demandas, porém, em problemas com alto grau de complexidade, com número de demandas elevado, faz-se necessária a utilização de métodos baseados em heurísticas e metaheurísticas em sua resolução.

### 4.2.3 Algoritmos Genéticos

Os Algoritmos Genéticos tiveram seus princípios desenvolvidos por John Holland em 1975, e trata-se de uma heurística de otimização inspirada na evolução biológica. Neste algoritmo, indivíduos competem entre si pela sobrevivência, evoluindo através de gerações. Cada indivíduo tem um grau de aptidão e espera-se que os mais aptos sobrevivam, propagando seu código genético. Após o trabalho de Holland (1975), outros autores deram sequência aos estudos com AG, tornando mais ampla sua pesquisa, dentre os quais podemos citar as contribuições de: GOLDBERG (1989), DAVIS (1991), BEASLEY, BULL e MARTIN (1993), SRINIVAS, PATNAIK, (1994), WHITLEY (1994) e MICHALEWICZ (1996). A Figura 11 apresenta o pseudo-código do *Evolution Program* (EP) proposto por Holland (1975).

|  |
|--|
| <p><b>Procedimento EP</b></p> <p>01 <math>t \leftarrow 0</math>;</p> <p>02 Inicializar <math>P(t)</math>;</p> <p>03 Avaliar <math>P(t)</math>;</p> <p>04 <b>enquanto</b> (critério de parada não for alcançado) <b>faça</b></p> <p>05     <math>t \leftarrow t + 1</math>;</p> <p>06     Seleciona <math>P(t)</math> de <math>P(t - 1)</math>;</p> <p>07     Altera <math>P(t)</math>;</p> <p>08     Avaliar <math>P(t)</math>;</p> <p>09 <b>fim enquanto</b>;</p> <p>10 <b>fim procedimento</b></p> |
|--|

Figura 11 - Evolution Program proposto por Holland (1975).

Fonte: Próprio autor.

O mecanismo de seleção natural dos AG's está baseado na sua aptidão, para tanto cada indivíduo é representado por um cromossomo que irá determinar a função de aptidão (FA) deste indivíduo. O cromossomo é uma codificação das características do indivíduo, ou seja, uma solução de um problema num espaço de busca. A codificação mais simples utilizada é a codificação binária, onde o cromossomo é representado por uma cadeia sobre o alfabeto  $\{0,1\}$ .

Baseado no cálculo da FA de cada indivíduo, são implementados métodos de seleção. Um dos métodos de seleção comumente utilizado é o Método da Roleta (MITCHELL, 1997). Neste método, os indivíduos são selecionados através do giro de uma roleta, onde cada setor circular desta roleta representa um indivíduo. Além disto, os setores são espaçados proporcionalmente à FA de cada indivíduo, fazendo com que a probabilidade de escolha de um indivíduo mais apto seja maior.

Novos indivíduos são gerados por um operador de cruzamento, que é a combinação do código genético de um par de indivíduos, previamente selecionado. O cruzamento pode ser de ponto único, de dois pontos, uniforme ou aritmético. Neste processo, inicialmente é escolhido um ponto de cruzamento aleatoriamente, produzindo dois ou mais fragmentos de cromossomo em cada pai. Posteriormente esses fragmentos são intercalados, formando dois novos indivíduos. Nesta pesquisa foi utilizado cruzamento de um ponto, onde a série binária desde o começo do cromossoma até o ponto de cruzamento é copiada do primeiro pai e o resto copiado do outro pai. Um operador de mutação é aplicado após o processo de cruzamento, que consiste na possível alteração aleatória de um gene do novo indivíduo gerado. Este operador pode provocar mudanças nas soluções dos indivíduos, evitando que os mesmos caiam em mínimos (ou máximos) locais (LINDEN, 2008).

Os principais parâmetros utilizados pelos AG's são (LINDEN, 2008):

- Tamanho da população: quantidades de indivíduos que será utilizado;
- Taxa de cruzamento: quantidade de novos indivíduos criados a cada interação;
- Taxa de mutação: quantidade de mutações aplicadas;
- Intervalo de geração: porcentagem da população que será substituída durante a próxima geração.

### **4.3 Metodologia**

O problema de localização abordado consiste em localizar as medianas para um grupo de clientes (demandas), dispersos pelas regiões do município. As medianas encontradas serão os locais aproximados para instalação das torres de rádio transmissão (facilidades). Estes locais encontrados deverão garantir a maior área de cobertura possível, conforme o raio de cobertura das antenas. Para Church e Revelle (1974), o PLMC tem como objetivo localizar 'p' facilidades de modo que a máxima população possível seja coberta dentro da distância de serviço. Uma demanda é considerada atendida se está dentro da distância de serviço de pelo menos uma facilidade. Foram utilizadas neste trabalho 84 unidades de atendimento do município entre escolas, postos de saúde e unidades administrativas diversas, dispersas na região metropolitana da cidade.

Para o cálculo das medianas utilizando AG, foi desenvolvido um algoritmo em linguagem PHP 5.6, sem a utilização de *frameworks* especializados. Os testes foram realizados a partir de computador com processador Core i5 1,8GHz, com 6GB de memória RAM e Sistema Operacional Windows 10. A aplicação foi desenvolvida de forma parametrizável facilitando as alterações para os diversos testes aplicados. Dentre os parâmetros considerados estão: número máximo de gerações (critério de parada), quantidade de facilidades disponíveis, taxa de mutação, taxa de crossover, uso de elitismo.

A API do Google Maps foi utilizada para leitura e captura da coordenadas geográficas dos pontos candidatos, que são lidas e armazenadas pelo algoritmo em um vetor multidimensional. Além das coordenadas geográficas, este vetor contém informações como o nome do cliente e um valor *booleano* para marcar se o cliente já foi atendido. No final dos cálculos, é possível visualizar os resultados da melhor solução encontrada no mapa do Google, juntamente com círculo da área de atendimento conforme o raio de cobertura da antena. A Figura 12 apresenta um exemplo de marcação dos pontos utilizando a API do Google Maps disponível na internet.

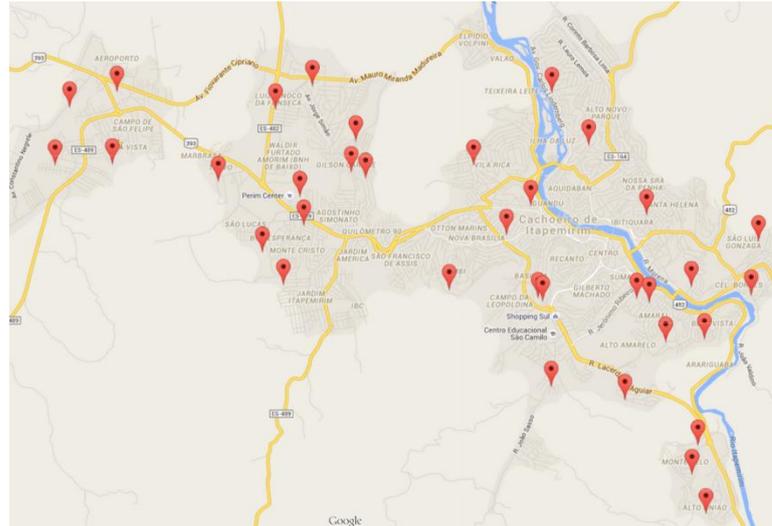


Figura 12 - Exemplo de localidades marcadas no Google Maps.

Fonte: Próprio autor.

O algoritmo trabalha com base em duas matrizes: a primeira contém a listagem de todas as demandas a serem atendidas, com informações relevantes para a função de avaliação (*fitness*) do algoritmo - uma função matemática é utilizada para este fim. A segunda (Tabela 1) calcula a distância de um ponto com todos os outros, para todos eles. Isto permite avaliar o atendimento a demanda por uma facilidade através do parâmetro raio de cobertura. Ao final é possível validar quais pontos estão mais aptos a se tornar uma facilidade.

Tabela 1 - Exemplo da matriz de distâncias.

|     | P1  | P2  | P3  | ... | Pn  |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| P1  | 0   | 5   | 7   | ... | P1n |
| P2  | 5   | 0   | 9   | ... | P2n |
| P3  | 7   | 9   | 0   | ... | P3n |
| ... | ... | ... | ... | 0   | ... |
| Pn  | P1n | P2n | P3n | ... | 0   |

Fonte: Próprio autor.

Na Figura 13 é apresentado o fluxograma básico do AG proposto. Conforme se pode observar, seus principais eventos são bem simples. Inicialmente é gerada uma população inicial aleatória de cromossomos de acordo com o tamanho da solução. Neste estudo, foram geradas populações de 100 indivíduos com 84 genes cada um. Este processo continua até atingir o critério de parada. Para cada nova população gerada seus indivíduos são avaliados através da função de Aptidão (*fitness*).

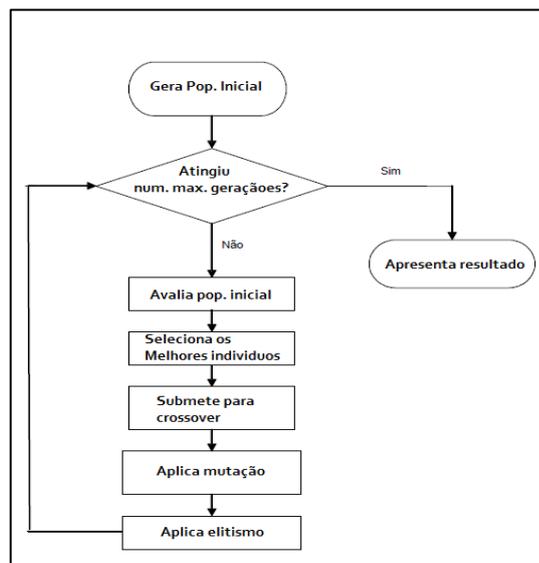


Figura 13 - Fluxograma do AG.  
Fonte: Próprio autor.

Cada cromossomo corresponde a uma solução do problema, de acordo com o posicionamento das demanda e facilidade. Seus genes são informações binárias que correspondem a uma demanda (0) ou facilidade (1) do problema. A ordem sequencial dos genes esta correlacionada à sequencia da primeira matriz, identificando cada ponto. Assim, para um problema com 84 demandas e 5 facilidades, foi montado um cromossomo de 84 genes (Figura 14). O objetivo é que a cada geração o melhor individuo seja mantido e ao final este seja a solução de maior capacidade de atendimento. A Figura 14 apresenta uma solução para o problema em formato de cromossomo

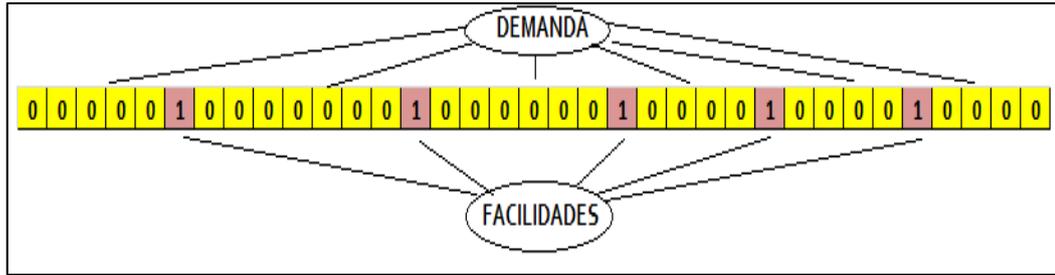


Figura 14 - Formato de cromossomo com seus genes.  
 Fonte: Próprio autor.

Se o elitismo é empregado, o melhor indivíduo de cada população é mantido para a próxima geração. Além do elitismo, são empregados os operadores genéticos: cruzamento e mutação. Um exemplo de cruzamento de um ponto é apresentado na Figura 15. O mesmo consiste em pegar partes dos melhores pais para gerar novos filhos, de acordo com a taxa de cruzamento estipulada. A taxa representa um percentual sobre o tamanho da população.

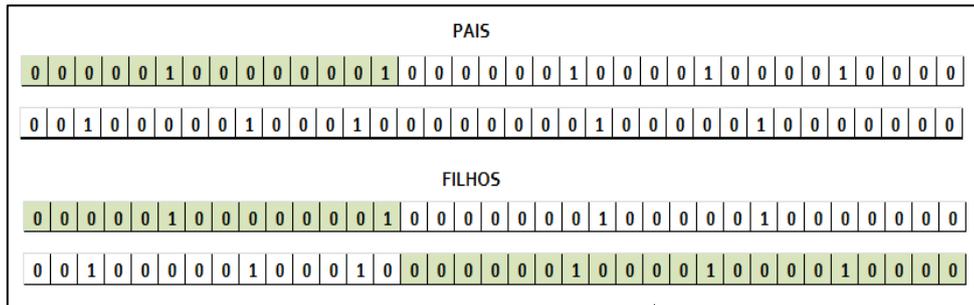


Figura 15 - Exemplo de cruzamento de 1 ponto de corte.  
 Fonte: Próprio autor.

A mutação é a permuta de posição entre dois genes do mesmo indivíduo a fim de melhorar a diversidade da solução, aplicada também de acordo com uma taxa estipulada, que representa um percentual da população. A Figura 16 apresenta um exemplo de mutação.

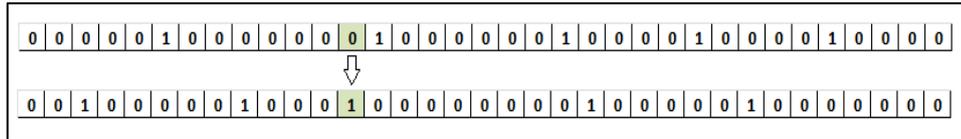


Figura 16 - Exemplo de Mutação de 1 (um) gene.

Fonte: Próprio autor.

#### 4.4 Resultados

Os experimentos foram realizados utilizando AG convencional e com elitismo. O AG convencional apresentou grande variação nos resultados, e menor cobertura durante as baterias de testes, conforme apresenta a Figura 17. Foram aplicados nos testes os seguintes parâmetros: população 100 indivíduos, mutação 10%, cruzamento 70%, raio de cobertura da antena de 1,5KM e com 1.000 iterações. O tempo de processamento médio foi de 5 min aproximadamente.

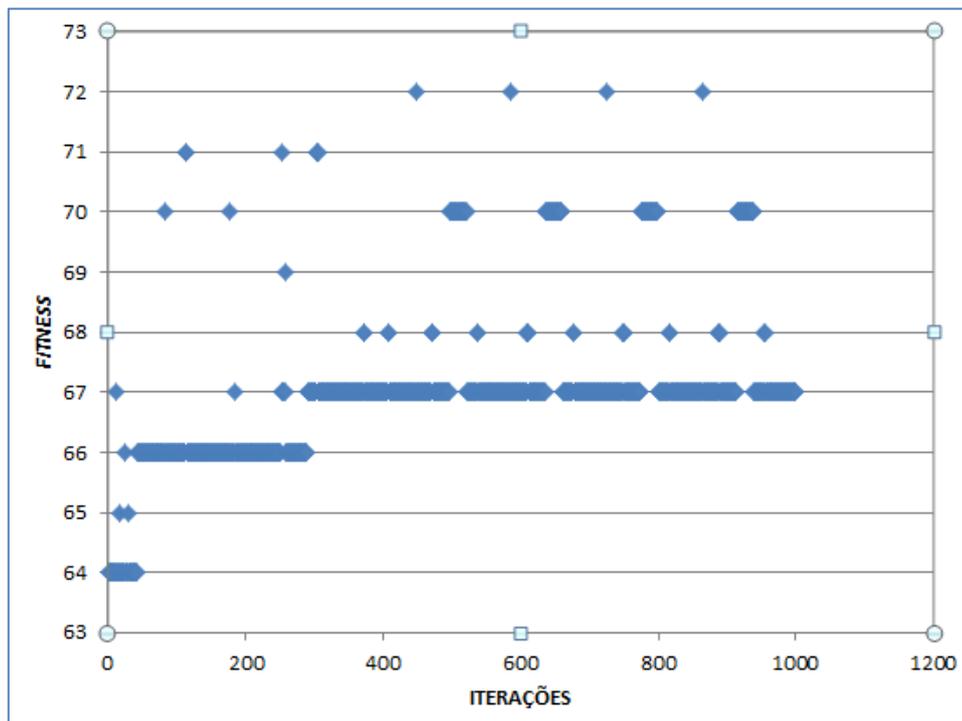


Figura 17 - AG aplicado sem elitismo.

Fonte: Próprio autor.

A Tabela 2 apresenta um quadro com os parâmetros utilizados no AG sem elitismo.

Tabela 2 - Parâmetros utilizados no AG sem elitismo.

| Parâmetro                | Valor          |
|--------------------------|----------------|
| Número de facilidades    | 5              |
| Raio de cobertura antena | 1,5 KM         |
| Tamanho da população     | 100 indivíduos |
| Taxa mutação             | 10%            |
| Taxa de crossover        | 70%            |
| Número de gerações       | 1.000          |
| Elitismo                 | Não            |

Fonte: Próprio autor.

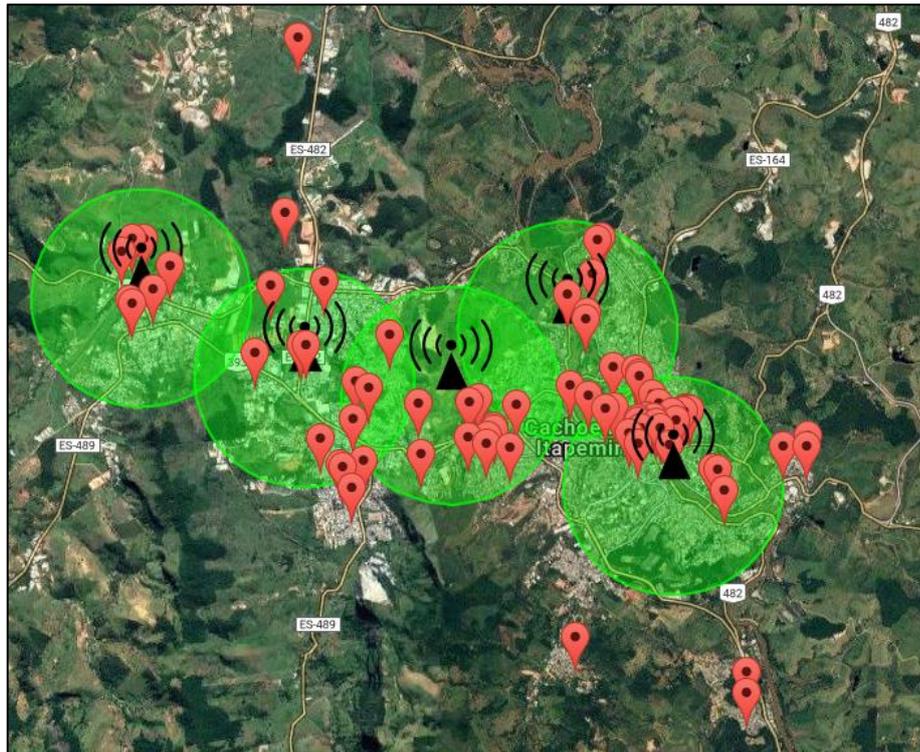


Figura 18 - Melhor solução sem aplicação de elitismo.

Fonte: Próprio autor.

O AG aplicado com elitismo teve melhor desempenho, utilizando-se dos mesmos parâmetros do teste anterior. As soluções apresentadas no decorrer dos testes apresentam maior estabilidade nos resultados, atingindo maior área de

cobertura. O elitismo mantém o melhor indivíduo de cada população, garantindo que a solução não irá piorar, conforme apresentado na Figura 19.

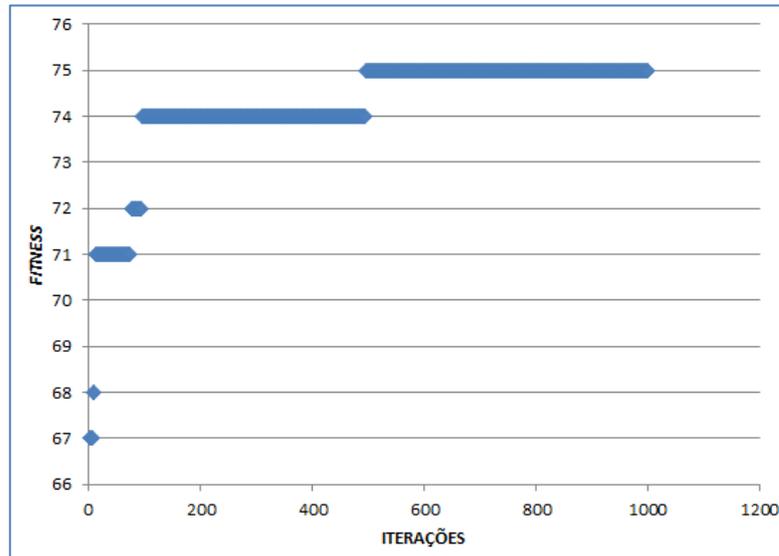


Figura 19 - Melhor solução utilizando AG com elitismo.  
Fonte: Próprio autor.

Pode-se observar que a partir 500 iterações ele já atinge o resultado próximo ao ótimo e não consegue mais evoluir. Um dos fatores causadores deste comportamento é controle do número de facilidades, sempre após um cruzamento é possível que o cromossomo obtenha mais ou menos facilidades que o estipulado nos parâmetros genéticos, pois o ponto de cruzamento é aleatório. Nestes casos o indivíduo é descartado, e o processamento continua até atingir o tamanho máximo da população. A Figura 21 apresenta uma imagem do resultado obtido em um dos testes realizados, utilizando o mapa da cidade como base.

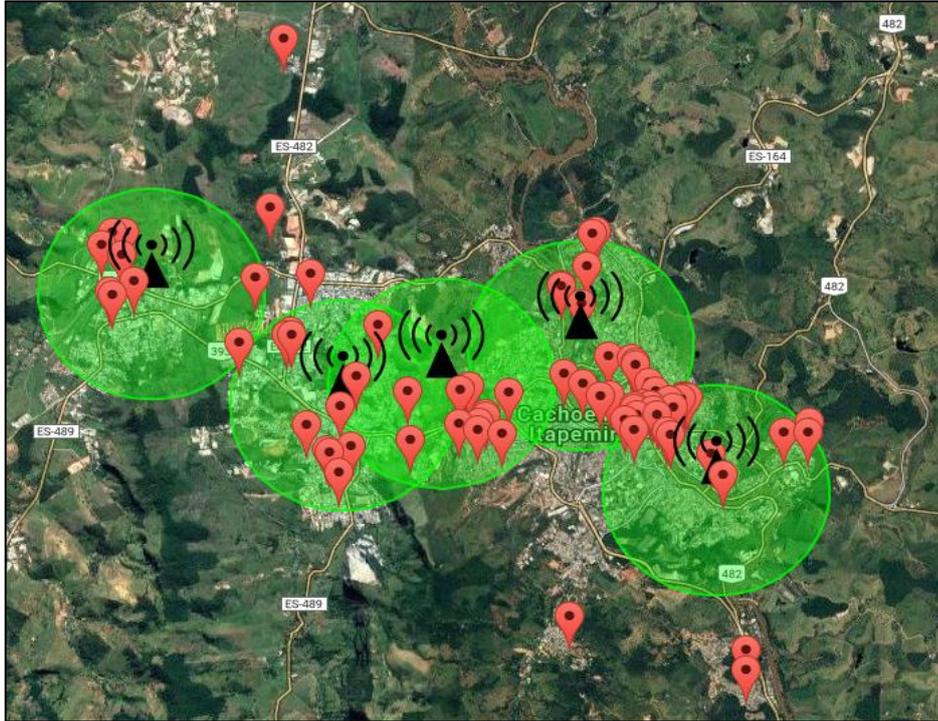


Figura 20 - Melhor solução encontrada com elitismo.  
Fonte: Próprio autor.

Na Figura 21 é apresentado um comparativo entre o desenvolvimento da solução utilizando AG com e sem elitismo. Pode-se observar que a solução com elitismo apresenta uma evolução constante do *fitness* (função de avaliação), atingindo o valor ótimo com menos iterações em relação a solução sem o elitismo. Os resultados apresentados demonstram que para este tipo de problema, o uso do AG com elitismo evolui de forma mais rápida para uma solução de melhor qualidade.

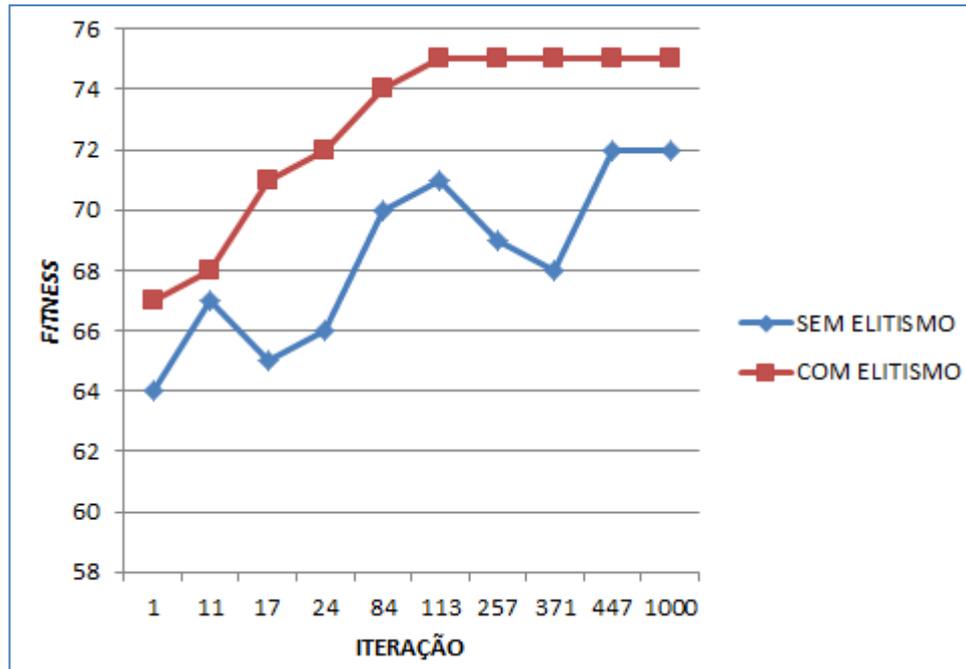


Figura 21 - Comparativo da melhor solução com e sem elitismo.  
Fonte: Próprio autor.

## 4.5 Conclusões

A alocação de torres de transmissão aplicando Algoritmos Genéticos apresentou índices satisfatórios mediante os testes realizados. Mesmo sendo um município com relevo muito montanhoso, as medianas se mostraram eficientes em relação aos seus posicionamentos, ficando bem próximas ao planejamento ideal. Isso mostra que em municípios de relevo menos acidentado, o aproveitamento será superior. O emprego do AG com elitismo obteve melhor resultado e mais rápido em relação ao AG convencional. Este estudo possibilita aos gestores públicos uma visão geral da distribuição espacial das cidades e os melhores locais para instalação de torres de radio transmissão, buscando reduzir os custos de instalação. Todo o código fonte utilizado estará disponível em "[https://github.com/mitmaya/ag\\_php](https://github.com/mitmaya/ag_php)". Para trabalhos futuros, pretende-se disponibilizar uma aplicação completa, integrada ao Google Maps, para cadastros de projetos com seus respectivos pontos de atendimentos.

#### 4.6 Referências Bibliográficas

ABDINNOUR-HELM, S. A hybrid heuristic for the uncapacitated hub location problem. **European Journal of Operational Research**, v. 106, n. 2-3, 489-499, 1998.

ADENSO-DIAZ, B.; RODRIGUEZ, F. A Simple search Heuristic for the MCLP: Application to the location of ambulance bases in a Rural region. **Omega, The International Journal of Management Science**, v. 25, n. 2, p. 181-187, apr. 1997.

ARROYO, J. E. C.; MARQUES, T. B.; CORTES, J. M. R. Um algoritmo genético para o problema de alocação de antenas de transmissão. In: Encontro Nacional de Engenharia de Produção, 26., 2006, Fortaleza. **Anais...**

BEASLEY, D.; MARTIN, R.; BULL, D. An overview of genetic algorithms: Part 1. Fundamentals. **University computing**, v. 15, p. 58-58, 1993.

BRANDEAU, M. L.; CHIU, S.S. An Overview of Representative Problems in Location Research. **Management Science**, v. 35, n. 6, p. 645-674, 1989.

CHIYOSHI, F.; GALVÃO, R. D. A statistical analysis of simulated annealing applied to the p-median problem. **Annals and Operations Research**, v. 96, n. 1-4, p. 61-74, 2000.

CHUNG, C. H. Recent application of the maximal covering location planning (MCLP) model. **Journal of the Operational Research Society**, v. 37, n. 8, p. 735-746, 1986.

CHURCH, R.; REVELLE, C. The maximal covering location problem. **Papers of the Regional Science Association**, v. 32, p. 101-118, 1974.

CHURCH, R. L.; REVELLE, C. S. Theoretical and Computational Links between the p-Median, Location Set-covering, and the Maximal Covering Location Problem. **Geographical Analysis**, v. 8, n. 4, p. 406-415, 1976.

COSTA, D. Search Algorithm for Computing an Operational Time Table. **European Journal of Operational Research**, v. 76, n. 1, p. 98-110, 1994.

CRAINIC, T. G. Cooperative Parallel Variable Neighborhood Search for the p-Median. **Journal of Heuristics**, v. 10, p. 293-314, 2004.

DAVIS, L. Handbook of genetic algorithms. New York: Van Nostrand Reinhold, 385p, 1991.

GAREY, M. R.; JOHNSON, D. S. **Computers and Intractability: A Guide to the Theory of NP Completeness**. New York: W. H. Freeman & Co., 1979. 340 p.

GOLDBERG, D. E. **Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning**. Boston: Addison-Wesley Longman Publishing Co, 1989. 372p..

MLADENOVIC, N.; HANSEN, P. "A Variable Neighborhood Search", *Computers and Operations Research*, 24: 1097-1100, 1997.

HILLER, F. S.; LIEBERMAN, G. J. **Introdução à Pesquisa Operacional**. 8. ed. Porto Alegre: AMGH, 2013. p. 1-6.

HOLLAND, J. H. **Adaptation in natural and artificial systems: An introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence**. Oxford, England: U Michigan Press, 1975.

HAKAMI, S. L. Optimum Locations of Switching Centers and the Absolute Centers and Medians of a Graph. **Operations Research**, v. 12, n. 3, p. 450-459, 1964.

Khumawala, B. M. An Efficient Algorithm for the p-Median Problem With Maximum Distance Constraints. **Geographical Analysis**, v. 5, n. 4, p. 309-321, 1973.

LORENA, L. A. N.; PEREIRA, M. A. A lagrangean/surrogate heuristic for the maximal covering location problem using Hillsman's edition. **International Journal of Industrial Engineering**, v. 9, n. 1, p. 57-67, 2012.

LORENA, L. A. N.; SENNE, E. L. F. Local search heuristics for capacitated p-median problems. *Networks and Spatial Economics*, v. 3, n. 4, p. 407-419, 2003.

LORENA, L. A. N.; LOPES, L. S. Genetic Algorithms Applied to Computationally Difficult Set Covering Problems. **Journal of the Operational Research Society**, v. 48, n. 4, p. 440-445, 1997

LINDEN, R. **Algoritmos Genéticos**. 2. Ed. Rio de Janeiro: Brasport, 496p, 2008.

MICHALEWICZ, Z. Genetic algorithms + data structures = Evolution Programs. Charlotte-USA: Ed. Springer-Verlag, 1996. 387p.

MITCHELL, M. **An introduction to genetic algorithms**. Cambridge: Mit Press. 207p.

Murray, A.T.; Church, R. L. Applying simulated annealing to location-planning models. *Journal of Heuristics*, v. 1, n. 2, p. 31-53, 1996.

RESENDE, M. G. C.; WERNECK, R. F. A Hybrid Heuristic for p-Median Problem. **Journal of Heuristics**, v. 10, n. 1, p. 59-88, 2004.

SRINIVAS, M.; PATNAIK, L. M. Genetic algorithms: a survey. **Computer**, v. 27, n. 6, p. 17-26, 1994.

SCHILLING, D. A.; JAYARAMAN, V.; BARKHI, R. A review of covering problems in facility location. **Location Science**, v. 1, n. 1, p. 25–55, 1993.

WHITLEY, D. A genetic algorithm tutorial. **Statistics and Computing**, v. 4, n. 2, p. 65-85, 1994.

## 5 ARTIGO C – META HEURISTICA GRASP PARA O PROBLEMA DE POSICIONAMENTO DE TORRES DE DISTRIBUIÇÃO DE SINAL DE INTERNET

### RESUMO

Este trabalho explora a metaheurística GRASP para resolver o problema de posicionamento de torres de distribuição de sinal de internet em uma rede metropolitana. O objetivo é encontrar o melhor local para instalação de um grupo limitado de facilidades, de modo a atender o maior número de demandas possíveis, otimizando os custos do projeto. Para tal foi construído um algoritmo utilizando a linguagem PHP, utilizando a metaheurística GRASP. O modelo proposto é baseado no Problema de Localização de Máxima Cobertura – PLMC, e utiliza a API do Google Maps para descoberta das facilidades e apresentação do resultado final. Testes computacionais realizados com o ambiente do problema comprovaram o desempenho satisfatório da heurística proposta.

**PALAVRAS-CHAVE:** GRASP. PLMC. GOOGLE MAPS.

### ABSTRACT

This work explores the GRASP metaheuristic to solve the problem of positioning of internet signal distribution towers in a metropolitan network. The goal is to find the best location for a limited set of facilities to meet as many demands as possible, while optimizing project costs. For this, an algorithm was constructed using the PHP language, using GRASP metaheuristics. The proposed model is based on the Maximum Coverage Localization Problem (PLMC) and uses the Google Maps API to discover the facilities and presentation of the final result. Computational tests performed with the problem environment proved the satisfactory performance of the proposed heuristic.

**KEYWORDS:** GRASP. MCLP. GOOGLE MAPS.

## 5.1 Introdução

Redes Metropolitanas (MAN) abrangem uma cidade visando ampliar a área de cobertura do sinal para diferentes aplicações, podendo ser, por exemplo, a cobertura do sinal de TV ou internet entre outros. Elas podem ser compostas por meios de transmissão e tecnologias diversas, sendo os principais meios a Fibra Óptica e as WLANS (Wireless LAN). As vantagens e desvantagens de cada meio de transmissão devem ser medidas individualmente para cada projeto onde serão aplicados, gerando uma relação custo/benefício satisfatória. Em uma análise rápida pode-se dizer que a Fibra Óptica apresenta maior banda passante, sendo ideal para *backbone* que exigem altas velocidades, porém seu custo de lançamento e manutenção também são superiores se comparados a outros meios de transmissão. Redes WLANs operam no padrão IEEE 802.11 combinando mobilidade, custos e velocidades satisfatórias em ambientes domésticos e corporativos, podendo ser utilizadas em ambiente outdoor de longas distâncias. Muito utilizadas por provedores de internet, as WLANs tem se tornado componente crucial na ampliação das redes de comunicação (SOARES, 1995).

Para a expansão de cobertura em uma WLAN, é necessária a instalação de torres de comunicação utilizadas na transmissão e retransmissão do sinal *wireless*. Essas torres devem ser posicionadas estrategicamente visando o atendimento de máxima cobertura aos clientes, cobrindo preferencialmente as áreas de maior densidade populacional. Durante a pesquisa por novos locais para instalação de torres de sinal de internet alguns aspectos devem ser levados em consideração:

- Número de clientes a atender em determinada área;
- Altitude mínima para instalação de uma antena a fim de se evitar áreas de sombra no lado cliente;
- Disponibilidade de locação ou aquisição dos imóveis para estas instalações. É muito importante que os locais escolhidos disponham de facilidades como: energia elétrica, facilidade de acesso e segurança física para as instalações;
- Raio de cobertura do sinal, que é limitado à potência dos transmissores.

Diante dessas variáveis surge o problema a ser abordado neste trabalho, que é o de determinar as melhores localizações para implantação de um número restrito de torres de distribuição de sinal internet para o projeto “Cachoeiro Digital” no município de Cachoeiro de Itapemirim – ES. Esta iniciativa do município, baseada no conceito de cidades inteligentes, visa integrar todos os componentes da administração pública municipal, direta e indireta, tais como escolas, postos de saúde, e outros, totalizando aproximadamente 150 pontos dispersos na zona urbana do município, formando uma rede MAN (*Metropolitan Area Network*), para suporte aos diversos serviços oferecidos pela administração municipal. A Figura 22 esboça o conceito de cidades digitais.

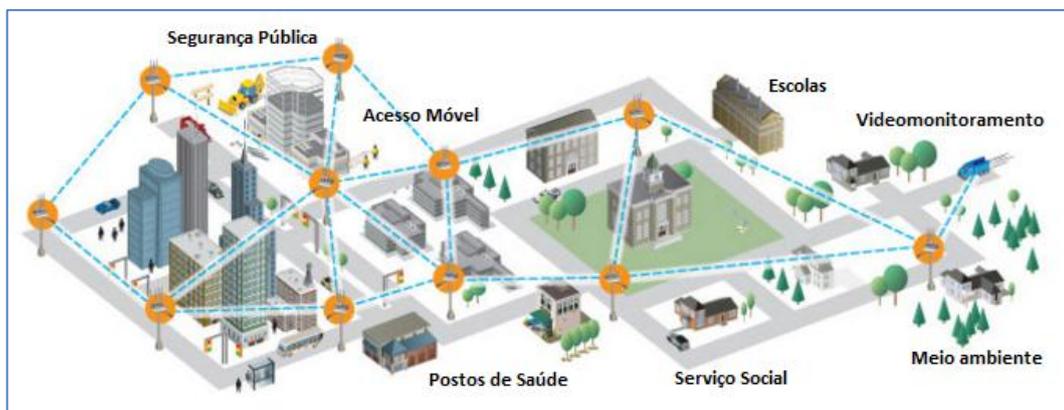


Figura 22 - Conceito de cidades inteligentes.

Fonte: Adaptado de: Maila Networks (2017).

O trabalho propõe utilizar a metaheurística GRASP (*Greedy Randomized Adaptive Search Procedure*) para resolver o problema de localização de máxima cobertura não capacitado - PLMC. Esta metaheurística tem sido proposta na resolução de problemas de otimização, conforme (VIANNA; ARROYO, 2004; ARROYO et al. 2008; HIGGINS, et al., 2008; ISHIDA, et al., 2008). Em problemas de localização não capacitado, não existe obrigação de atendimento a todas as demandas.

O artigo está organizado da seguinte maneira. A Seção 2 contém a descrição do problema abordado. Na Seção 3, é apresentada a heurística implementada. Na Seção 4, os testes computacionais realizados. Na Seção 5, os resultados. Na última seção, 6, encontram-se as conclusões do trabalho.

## 5.2 Problemas de localização

Em um problema de localização deseja-se conhecer onde serão sediadas facilidades (fábricas, depósitos, hospitais, escolas, etc.) para atender de forma otimizada um conjunto de pontos de demandas. Devido a sua importância no auxílio a uma alta variedade de problemas, seu estudo vem sendo aprofundado pela comunidade científica, existindo uma extensa literatura a respeito (BRANDEAU; CHIU, 1989).

A busca pela localização ideal para instalação de pontos de facilidade é um trabalho comum para um problema pequeno com baixo número de demandas. Porém, em problemas com alto grau de complexidade, com número de demandas elevado, faz-se necessária a utilização de métodos baseados em heurísticas e meta-heurísticas em sua resolução, que determinam soluções ótimas ou próximas do ótimo global (RESENDE; WERNECK, 2006; MLADENOVIC et al., 2007). Este é um típico problema da classe NP-hard (GAREY; JOHNSON, 1979), ou seja, problemas que apresentam alto custo computacional. Tempos computacionais excessivos serão requeridos para que boas soluções possam ser consideradas satisfatórias no contexto de tomadas de decisão.

### 5.2.1 Problemas de localização de torres transmissão para sinal de internet (WLAN)

Uma torre de transmissão é o local onde se instalam os componentes de uma WLAN para propagação do sinal que irá cobrir as demandas, entregando o serviço desejado: internet, tv ou outros. As antenas e os rádios transmissores são os componentes essenciais do projeto. Elementos como potência do transmissor, ganho da antena e frequência de transmissão, irão determinar a cobertura do sinal em um determinado setor, bem como a quantidade de demandas que poderão ser atendidas. Embora o problema de localização de antenas de transmissão seja um problema

antigo, sua abordagem científica começou a receber um maior enfoque recentemente, conforme citam os trabalhos de Hoffman e Gómez (2003), Marques (2007) e Siliprande (2009).

Marques, Arroyo e Vianna (2007) apresentaram duas heurísticas diferentes para a solução do problema, uma utilizando GRASP e outra utilizando Algoritmo Genético (AG), a fim de comparar seus desempenhos. O modelo matemático empregado levou em consideração situações como: número desconhecido de facilidades; altura de obstáculos do relevo; e distância da propagação do sinal.

Já Siliprande (2009), propôs uma heurística baseada em Algoritmo Genético para tratar o problema de localização de antenas de internet no município de Itaperuna – RJ. Para tal, foi apresentado um modelo de programação linear multiobjetivo na forma de um PLMC (Problema de Localização de Máxima Cobertura), desenvolvido utilizando conceitos de radio transmissão em ambientes abertos, com objetivos de minimizar a distância entre demandas e facilidades, maximizando a área de cobertura e reduzindo os custos do projeto.

### 5.2.2 PLMC

Para casos onde o raio de cobertura é um fator limitador, como por exemplo, em posicionamentos de torres de transmissão de sinal, é necessário estabelecer esse parâmetro (raio) para garantir a qualidade de serviço e aplicabilidade do problema. Neste caso o problema é denominado como Problema de Localização de Máxima Cobertura - PLMC (KHUMAWALA, 1973).

O PLMC visa maximizar a cobertura de demandas por facilidades a partir de um ponto **P** com raio **R**, conforme apresenta a Figura 23. Para casos onde é tratada a abrangência de sinal, sua aplicação torna-se imprescindível, devido à limitação dos rádios transmissores.

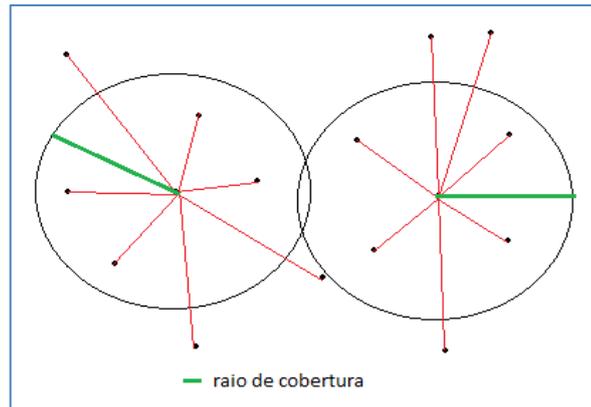


Figura 23 - Exemplo de configuração do PLMC.

Fonte: Próprio autor.

### 5.3 Metaheurística GRASP

A Metaheurística GRASP (Greedy Randomized Adaptive Search Procedure) foi proposta inicialmente por Feo e Resende (1995), e desde então vem sendo bastante utilizada na resolução de problemas de otimização (RESENDE; RIBEIRO, 2005). O procedimento consiste em duas fases iterativas: fase de construção (Figuras 24 e 25) e fase de busca local ou refinamento (Figura 26).

```

procedure GRASP(Max_Iterations, Seed)
1   Read_Input();
2   for k = 1, ..., Max_Iterations do
3       Solution <- Greedy_Randomized_Construction(Seed);
4       Solution <- Local_Search(Solution);
5       Update_Solution(Solution, Best_Solution);
6   end;
7   return Solution;
end GRASP.

```

Figura 24 - Pseudo-código GRASP.

Fonte: Próprio autor.

Na fase de construção é gerada uma solução inicial a partir de uma lista restrita de candidatos RCL ou LCR. A LCR é determinada pelo pseudo-código apresentado na Figura 4.

```

procedure Greedy_Randomized_Construction(Seed)
1   Solution <-  $\emptyset$ ;
2   Evaluate the incremental costs of the candidate elements;
3   while Solution is not a complete solution do
4       Build de restricted candidate list (RCL);
5       Select an element s from RCL at random;
6       Soution <- Solution U{s};
7       Reevaluate the incremental costs;
8   end;
9   return Solution;
end Greedy_Randomized_Construction.

```

Figura 25 - Pseudo-código GRASP - fase de construção.  
Fonte: próprio autor.

A fase de busca local consiste em refinar a solução inicial encontrada, utilizando algum método de busca local. Essa intensificação na busca ocorre com a exploração de regiões vizinhas, visando encontrar um ótimo local. O GRASP tem como diferencial amostrar o espaço com gerações rápidas. Nesse sentido quanto melhor for a qualidade da solução inicial, mais rápido será a velocidade para encontrar um ótimo local pela fase de busca local. Nesta fase pode ser empregado qualquer outro algoritmo: Busca Tabu, *Hillclimbing*, *Local beam*, etc.

```

procedure Local_Search(Solution)
1   while Solution is not locally optimal do
2       Find s' belongs N(Solution) with  $f(s') < f(Solution)$ ;
3       Solution <- s';
4   end;
5   return Solution;
end Local_Search.

```

Figura 26 - Fase de busca local GRASP.  
Fonte: Próprio autor.

GRASP é uma Metaheurística singular (não populacional) que explora o espaço das soluções por meio de movimentos aplicados a cada passo sobre uma solução corrente. Deve se manter uma única solução corrente, não fazendo uso de históricos no processo de busca, sendo todas as soluções prévias descartadas.

## 5.4 Testes computacionais

Para realização dos testes computacionais foi desenvolvido um algoritmo em linguagem PHP, versão 5.6, sem a utilização de frameworks especializados, sendo a fase de processamento toda executada em modo texto. Os testes foram realizados a partir de um computador com processador *Core i5* 1,8GHz, com 6GB de memória RAM (Random Access Memory) e Sistema Operacional *Windows* 10. A aplicação foi desenvolvida de forma parametrizável facilitando as alterações para os diversos testes aplicados. Dentre os parâmetros considerados estão:

- Número máximo de iterações;
- Quantidade de facilidades disponíveis;
- Valor de alpha ( $\alpha$ ) para cálculo do LCR (Lista restrita de candidatos);
- Raio de atendimento da antena.

Foram testadas algumas variações em “alpha ( $\alpha$ )” em função do número máximo de iterações e os melhores ajustes encontrados foram  $\alpha=0.1$  (baixa aleatoriedade) e critério de parada = 10.000 iterações. O parâmetro altitude não foi considerado neste projeto, podendo ser objeto de estudo futuro.

Os pontos candidatos são as escolas, postos de saúde, e demais unidades administrativas do município, constantes do projeto. Primeiro foram capturadas as coordenadas geográficas desses pontos, e armazenadas em um vetor. Este vetor contém informações como o nome da localidade, longitude e latitude do ponto, um valor booleano para marcar o atendimento, e a informação binária (0-demanda / 1-facilidade). Ao final dos cálculos é possível plotar os resultados da melhor solução encontrada no mapa, juntamente com círculo da área de atendimento conforme o raio da antena, possibilitando uma melhor visualização dos resultados (Figura 27).

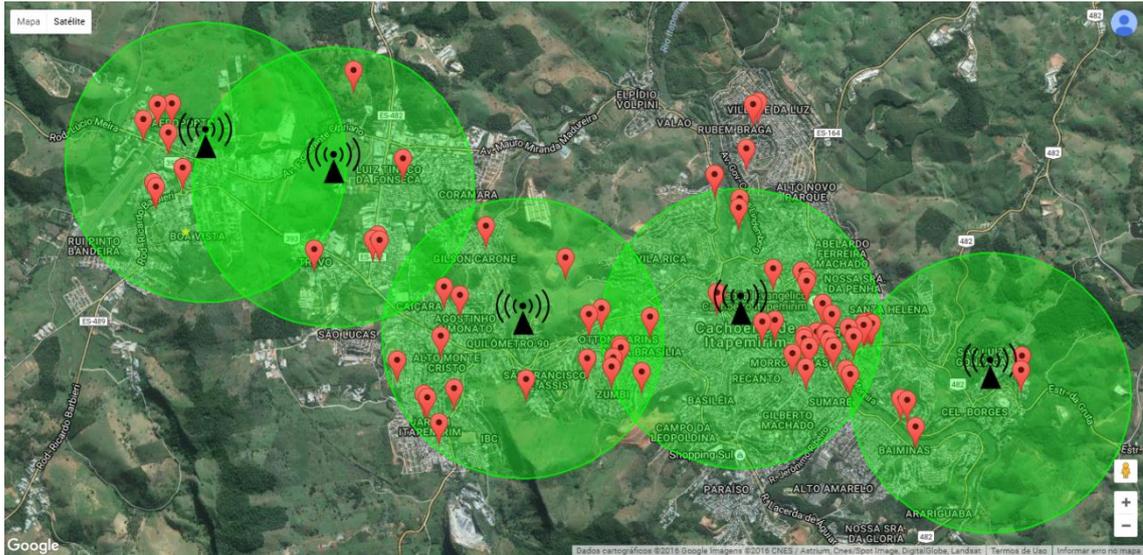


Figura 27 - API Google Maps aplicada na visualização de uma solução encontrada.  
 Fonte: Próprio autor.

Para o cálculo das distâncias entre os pontos foi utilizada uma matriz de capacidades, ponto a ponto, permitindo à função de aptidão do algoritmo, validar as facilidades de maior capacidade de atendimento, conforme exemplo na Tabela 3.

Tabela 3 - Matriz de capacidades.

|     | P1  | P2  | P3  | ... | Pn  |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| P1  | 0   | 5   | 7   | ... | P1n |
| P2  | 5   | 0   | 9   | ... | P2n |
| P3  | 7   | 9   | 0   | ... | P3n |
| ... | ... | ... | ... | 0   | ... |
| Pn  | P1n | P2n | P3n | ... | 0   |

Fonte: Próprio autor.

### 5.5 Resultados

O algoritmo foi aplicado em duas fases, conforme prevê a metaheurística GRASP. Na primeira fase foi gerada uma solução inicial de baixa qualidade, isto em função do valor de  $\alpha$  representar a aleatoriedade, e também por estar limitado a uma única iteração. Nesta fase a LCR é ajustada de forma quase sequencial, ou seja, é

respeitada a ordem de entrada dos elementos no vetor de pontos, e a ordem é quase sequencial. Foram utilizados nos testes, os parâmetros informados na tabela 4.

Tabela 4 - Parâmetros utilizados nos testes.

| Parâmetros               | Valores |
|--------------------------|---------|
| Total de pontos          | 84      |
| Total de facilidades     | 5       |
| Raio de cobertura antena | 1,5KM   |
| Num. Máximo de Iterações | 10.000  |
| $\alpha$                 | 0.1     |

Fonte: Próprio autor.

A segunda parte do algoritmo faz um refinamento na solução inicial buscando aumentar a área de cobertura das demandas. A Figura 28 apresenta uma linha de tendência próximo a 60 pontos de cobertura.

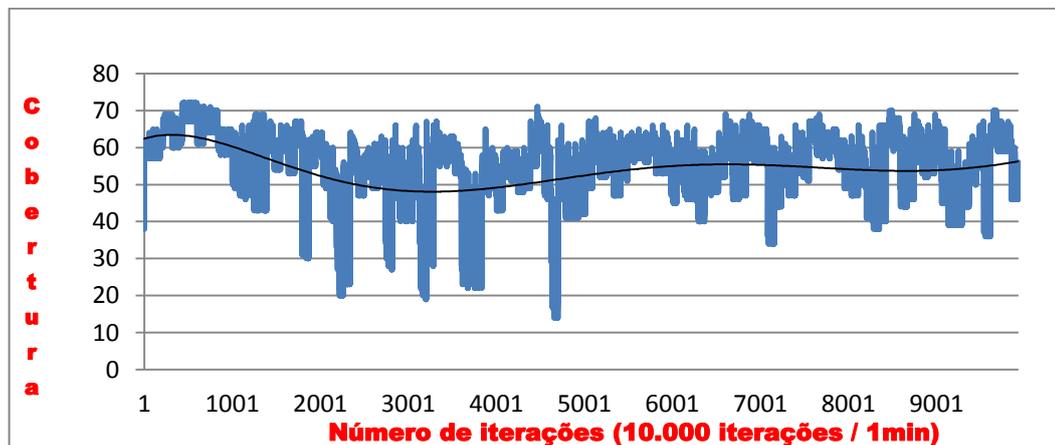


Figura 28 - Evolução das soluções obtidas na fase de busca local.

Fonte: O próprio autor.

O tempo de processamento foi satisfatório, levando em consideração um cálculo com 10.000 iterações, conforme Tabela 4, demorando em torno 60s. A área de cobertura atingida chegou a 88% das demandas, demonstrando que a metaheurística GRASP além de rápida é muito eficiente para este tipo de aplicação.

A Figura 29 apresenta um agrupamento das soluções divididas em percentuais, classificadas como muitas ruins soluções abaixo de 18 atendimentos, e ótimas as que possuem acima de 54 atendimentos. No total geral, soluções boas e ótimas somaram 93,4% do total de soluções.

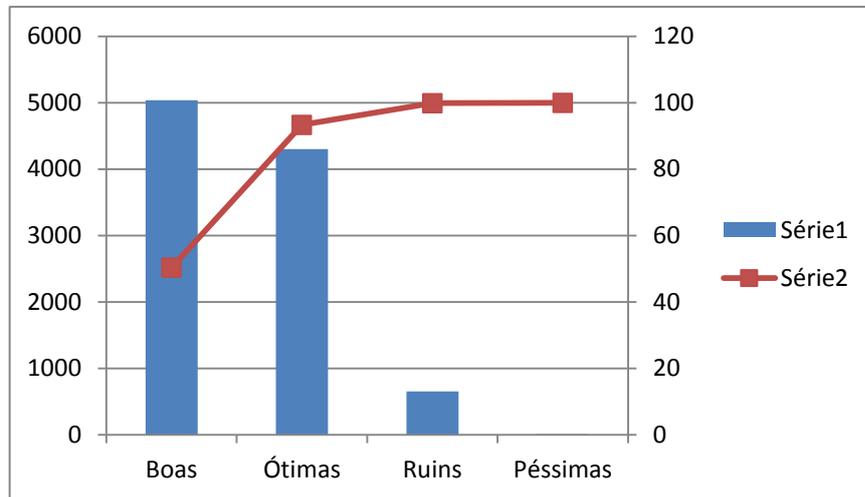


Figura 29 - Número de soluções Pareto-ótimas.

Fonte: Próprio autor.

O Gráfico 3 mostra a cobertura da melhor solução encontrada, com 88% de cobertura, com tempo de processamento abaixo de 1min.

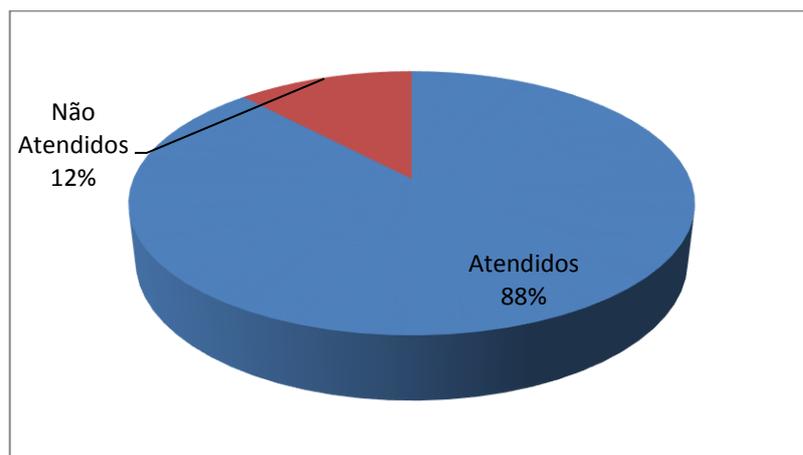


Figura 30 - Área de Cobertura da melhor solução encontrada.

Fonte: Próprio autor.

## 5.6 Conclusões

Este trabalho buscou mostrar a aplicabilidade da Metaheurística GRASP a um problema real de p-medianas, neste caso o “Projeto Cachoeiro Digital” em Cachoeiro de Itapemirim-ES. A intensificação com busca local mostrou-se bastante satisfatória, tanto em função do tempo de processamento quanto em função da área de cobertura conseguida, conforme apresentada nos resultados.

Este algoritmo e seus módulos estão disponíveis para download em “[https://github.com/mitmaya/GRASP\\_PHP](https://github.com/mitmaya/GRASP_PHP)”. Em paralelo está sendo desenvolvida uma aplicação WEB, totalmente integrada ao *Google Maps*, que irá permitir o cadastro de novos projetos em qualquer cidade, e o cálculo das medianas para atendimentos às demandas, utilizando este algoritmo. Isso permitirá a qualquer gestor uma visão rápida das possíveis localizações de facilidades em uma determinada cidade, auxiliando na tomada de decisões.

É importante ressaltar que embora o foco do problema seja posicionamento de torres de transmissão para sinal de internet, o mesmo pode ser adaptado a outros problemas como: instalação de UPPs, escolas, hospitais, centros de distribuição, etc.

## 5.7 Referências Bibliográficas

BRANDEAU, M. L.; CHIU, S.S. An Overview of Representative Problems in Location Research. **Management Science**, v. 35, n. 6, p. 645-674, 1989.

CHURCH, R.; REVELLE, C. The maximal covering location problem. *Papers of the Regional Science Association*, v. 32, p. 101–118, 1974.

CHURCH, R. L.; REVELLE, C. S. Theoretical and Computational Links between the p-Median, Location Set-covering, and the Maximal Covering Location Problem. **Geographical Analysis**, v. 8, n. 4, p. 406-415, 1976.

FEO, T.A.; RESENDE, M. G. C. Greedy randomized adaptive search procedures. **Journal of Global Optimization**, v. 6, n. 2, p. 109-133, 1995.

GAREY, M. R.; JOHNSON, D. S. **Computers and Intractability: A Guide to the Theory of NP Completeness**. New York: W. H. Freeman & Co., 1979. 340 p.

HAKAMI, S. L. Optimum Locations of Switching Centers and the Absolute Centers and Medians of a Graph. **Operations Research**, v. 12, n. 3, p. 450-459, 1964.

HOFFMAN, L.T.; GÓMEZ, A.T., Uma abordagem do problema de localização de torres de rádio transmissão auxiliado por um sistema de informação geográfica. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL,36., 2003, Natal, RN. **Anais...**

Khumawala, B. M. An Efficient Algorithm for the p-Median Problem With Maximum Distance Constraints. **Geographical Analysis**, v. 5, n. 4, p. 309-321, 1973.

LORENA, L. A. N.; PEREIRA, M. A. A lagrangean/surrogate heuristic for the maximal covering location problem using Hillsman's edition. **International Journal of Industrial Engineering**, v. 9, n. 1, p. 57-67, 2012.

MARQUES, T.B.; ARROYO, J.E.C.; VIANNA, D.S., Heurísticas Para O Problema De Alocação De Antenas De Transmissão. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL, 39., 2007, Fortaleza-CE. **Anais...**

PIZZOLATO, N. D., BARCELOS, F. B. AND NOGUEIRA LORENA, L. A., School location methodology in urban areas of developing countries. *International Transactions in Operational Research*, 2004.

RESENDE, M. G. C.; WERNECK, R. F. A hybrid multistart heuristic for the uncapacitated facility location problem. **European Journal of Operational Research**, v. 174, n. 1, p. 54–68, 2006.

RESENDEL M.G., RIBEIRO C.C. GRASP with Path-Relinking: Recent Advances and Applications. In: Ibaraki T., Nonobe K., Yagiura M. (eds) *Metaheuristics: Progress as Real Problem Solvers*. *Operations Research/Computer Science Interfaces Series*, v. 32. Springer, Boston, MA, p. 25-55, 2005.

SILIPRANDE, M. D. **Localização de antenas de transmissão para internet wireless**: uma aplicação com abordagem genética para o município de Itaperuna. 2009. 90f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - UENF, Campos dos Goytacazes, 2009.

STEVES, L. C. **Antenas**: Teoria básica e aplicações, São Paulo: McGraw-Hill, 1980

VIANNA, D. S.; ARROYO, J. E. A GRASP Algorithm for the Multi-Objective Knapsack Problem. In: XXIV INTERNATIONAL CONFERENCE OF THE CHILEAN COMPUTER SCIENCE SOCIETY, 24., 2004, Arica, Chile. **Anais...** 2004. p. 69-75, 2004.

## 6 Considerações finais

Esta pesquisa apresentou duas heurísticas diferentes para solução do problema de localização de antenas para distribuição de sinal de Internet. A primeira baseada na metaheurística Algoritmos Genéticos e a segunda baseada na metaheurística GRASP, demonstrando o resultado obtido com ambas. O problema, considerado importante para o segmento de sistemas de telecomunicações, em especial os provedores de internet, foi modelado como um Problema de Localização de Máxima Cobertura, aplicado ao conceito de cidades digitais para o posicionamento ideal de Antenas wireless.

A utilização da API do Google Maps foi de extrema importância para o mapeamento dos pontos, que antes só seria possível através da coleta *in loco* das coordenadas geográficas através GPS. A utilização desta interface proporcionou maior agilidade para os testes e simulações. Outro detalhe é a plotagem dos pontos sobre o mapa da cidade ao final dos cálculos, isso permite uma visualização prévia dos resultados. O mapeamento dos resultados obtidos pelos Algoritmos Genéticos permite a análise visual de modo a auxiliar o processo de decisão locacional no planejamento dos sistemas de rede wireless.

Conclui-se com este trabalho que as técnicas utilizadas apresentaram desempenho satisfatório na solução de problemas de Localização de antenas, e que o modelo de solução proposto é genérico podendo também ser aplicado a outros problemas de Localização.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDINNOUR-HELM, S. A hybrid heuristic for the uncapacitated hub location problem. **European Journal of Operational Research**, v. 106, n. 2-3, 489-499, 1998.

ADENSO-DIAZ, B.; RODRIGUEZ, F. A Simple search Heuristic for the MCLP: Application to the location of ambulance bases in a Rural region. **Omega, The International Journal of Management Science**, v. 25, n. 2, p. 181-187, apr. 1997.

ARAKAKI, R.G.I; LORENA, L.A.N. Uma heurística de localização-alocação (HLA) para problemas de localização de facilidades. **Revista Produção**, v. 16, n. 2, p. 319-328, Maio/Ago 2006.

ARROYO, J. E. C.; MARQUES, T. B.; CORTES, J. M. R. Um algoritmo genético para o problema de alocação de antenas de transmissão. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 26., 2006, Fortaleza. **Anais...**

BEASLEY, D.; MARTIN, R.; BULL, D. An overview of genetic algorithms: Part 1. Fundamentals. **University computing**, v. 15, p. 58-58, 1993.

BARROS, A. J. S.; LEHFELD, N. A. S. **Fundamentos de Metodologia: Um Guia para a Iniciação Científica**. 2. ed. São Paulo: Makron Books, 2000.

BARTEL, A. P.; ICHNIOWSKI, CASEY; SHAW, KATHRYN L. How does information technology really affect productivity? Plant-level comparisons of product innovation, process improvement and worker skills. **National Bureau of Economic Research**, n. 11773, p. 1- 50, 2005.

BRANDEAU, M. L.; CHIU, S.S. An Overview of Representative Problems in Location Research. **Management Science**, v. 35, n. 6, p. 645-674, 1989.

CALDAS, F.W. **Aplicação de algoritmo genético para localização de rack de rede numa instalação de cabeamento estruturado em uma instituição de ensino**. Dissertação (Mestrado em Pesquisa Operacional e Inteligência Computacional) – Universidade Candido Mendes, Campos dos Goytacazes, 2013.

CARDOSO, R. L. et al. Pesquisa científica em contabilidade entre 1990 e 2003. **Revista de Administração de Empresas**, v. 45, n. 2, p. 43-55, 2005.

CHIYOSHI, F.; GALVÃO, R. D. A statistical analysis of simulated annealing applied to the p-median problem. **Annals and Operations Research**, v. 96, n. 1-4, p. 61-74, 2000.

CHUNG, C. H. Recent application of the maximal covering location planning (MCLP) model. **Journal of the Operational Research Society**, v. 37, n. 8, p. 735-746, 1986.

CRAINIC, T. G. Cooperative Parallel Variable Neighborhood Search for the p-Median. **Journal of Heuristics**, v. 10, p. 293-314, 2004.

CHURCH, R.; REVELLE, C. The maximal covering location problem. **Papers of the Regional Science Association**, v. 32, p. 101–118, 1974.

CHURCH, R. L.; REVELLE, C. S. Theoretical and Computational Links between the p-Median, Location Set-covering, and the Maximal Covering Location Problem. **Geographical Analysis**, v. 8, n. 4, p. 406-415, 1976.

COSTA, D. Search Algorithm for Computing an Operational Time Table. **European Journal of Operational Research**, v. 76, n. 1, p. 98-110, 1994.

CURRENT, J.; O'KELLY, M. Locating emergency warnings sirens. **Decision Sciences**, v. 23, n. 1, p. 221–234, jan./fev. 1992.

DAVIS, L. Handbook of genetic algorithms. New York: Van Nostrand Reinhold, 385p, 1991.

EPSTEIN, MARC J.; REJC, ADRIANA. Measuring the payoffs of IT investments. **CMA Management**, v. 78, n. 8, p. 20-25, jan. 2005.

FEO, T.A.; RESENDE, M. G. C. Greedy randomized adaptive search procedures. **Journal of Global Optimization**, v. 6, n. 2, p. 109-133, 1995.

GAREY, M. R.; JOHNSON, D. S. **Computers and Intractability: A Guide to the Theory of NP Completeness**. New York: W. H. Freeman & Co., 340p, 1979. 340 p.

GIL, A. C. **Técnicas de pesquisa em economia e elaboração de monografias**. 3. ed. São Paulo: Atlas, 2000.

GOLDBERG, D. E. **Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning**. Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc., 1989. 372 p.

GOLDSCHMIDT, R. R. **Inteligência Computacional**. Rio de Janeiro: IST-Rio, p. 6, 2010.

HAKAMI, S. L. Optimum Locations of Switching Centers and the Absolute Centers and Medians of a Graph. **Operations Research**, v. 12, n. 3, p. 450-459, 1964.

HILLIER, F. S.; LIEBERMAN, G. J. **Introdução à Pesquisa Operacional**. 8. ed. Porto Alegre: AMGH, p. 1-6, 2013.

ARROYO, J. E. C.; MARQUES, T. B.; CORTES, J. M. R. Um algoritmo genético para o problema de alocação de antenas de transmissão. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 26., 2006, Fortaleza. **Anais...**

HOFFMAN, L.T.; GÓMEZ, A.T., Uma abordagem do problema de localização de torres de rádio transmissão auxiliado por um sistema de informação geográfica. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL, 35., 2003, Natal-RN. **Anais ...**

HOLLAND, J. H. **Adaptation in natural and artificial systems**: An introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence. Oxford, England: U Michigan Press, 1975.

HOLLAND, J.H. **Adaptation in Natural and Artificial Systems**. 2. ed. Cambridge MA EUA: The MIT Press, 1992.

Khumawala, B. M. An Efficient Algorithm for the p-Median Problem With Maximum Distance Constraints. **Geographical Analysis**, v. 5, n. 4, p. 309-321, 1973.

KÖCHE, J. C. **Fundamentos de metodologia científica**: teoria da ciência e iniciação à pesquisa. 20. ed. atualizada. Petrópolis, RJ: Vozes, 1997.

LINDEN, R. **Algoritmos Genéticos**. 2. Ed. Rio de Janeiro: Brasport, 496p, 2008.

LORENA, L. A. N.; LOPES, L. S. Genetic Algorithms Applied to Computationally Difficult Set Covering Problems. **Journal of the Operational Research Society**, v. 48, n. 4, p. 440-445, 1997.

LORENA, L. A. N.; PEREIRA, M. A. A lagrangean/surrogate heuristic for the maximal covering location problem using Hillsman's edition. **International Journal of Industrial Engineering**, v. 9, n. 1, p. 57-67, 2002.

LORENA, L. A. N.; PEREIRA, M. A. A lagrangean/surrogate heuristic for the maximal covering location problem using Hillsman's edition. **International Journal of Industrial Engineering**, v. 9, n. 1, p. 57-67, 2012.

LORENA, L. A. N.; SENNE, E. L. F. Local search heuristics for capacitated p-median problems. *Networks and Spatial Economics*, v. 3, n. 4, p. 407- 419, 2003.

MLADENOVIC, N.; HANSEN, P. "A Variable Neighborhood Search", *Computers and Operations Research*, 24: 1097-1100, 1997.

MARCONI, M. A.; LAKATOS, E. M. **Fundamentos da Metodologia Científica**. 5. ed. São Paulo: Editora Atlas, 2003.

MARQUES, T.B.; ARROYO, J.E.C.; VIANNA, D.S., Heurísticas Para O Problema De Alocação De Antenas De Transmissão. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL, 39., 2007. Fortaleza-CE. **Anais...**

MATTAR, FAUZE N. **Pesquisa de marketing: metodologia, planejamento**. 4. ed. Atlas, São Paulo-SP, 1997.

MICHALEWICZ, Z. *Genetic algorithms + data structures = Evolution Programs*, Charlotte-USA: Ed. Springer-Verlag , 1996. 387 p.

MITCHELL, M. **An introduction to genetic algorithms**. Cambridge: Mit Press. 207 p.

MOORI, R. G.; KIMURA, H.; ASAKRA, O. K. Aplicação do Algoritmo Genético na Administração de Suprimentos. **Revista de Administração e Inovação**, São Paulo, v. 7, n. 2, p. 171-192, abr./jun. 2010.

MURRAY, A.T.; CHURCH, R. L. Applying simulated annealing to location-planning models. **Journal of Heuristics**, v. 2, n.1, p. 31-53, 1996.

PAO, M. L. **Concepts of information retrieval**. Englewood, Colorado:Libraries Unlimited, Inc., 1989. 285 p.

PIZZOLATO, N. D.; SILVA, H. B. F. The Location of Public Schools: Evaluation of Practical Experiences. **International Transactions in Operational Research**, v. 4, n. 1, p. 13–22, 1997.

PIZZOLATO, N. D., BARCELOS, F. B. AND NOGUEIRA LORENA, L. A., School location methodology in urban areas of developing countries. *International Transactions in Operational Research*, 2004.

RESENDE, M. G. C.; WERNECK, R. F. A Hybrid Heuristic for p-Median Problem. **Journal of Heuristics**, v. 10, n. 1, p. 59-88, 2004.

RESENDE, M. G. C.; WERNECK, R. F. A hybrid multistart heuristic for the uncapacitated facility location problem. **European Journal of Operational Research**, v. 174, n. 1, p. 54–68, 2006.

RESENDE M.G., RIBEIRO C.C. GRASP with Path-Relinking: Recent Advances and Applications. In: Ibaraki T., Nonobe K., Yagiura M. (eds) *Metaheuristics: Progress as Real Problem Solvers*. Operations Research/Computer Science Interfaces Series, vol 32. Springer, Boston, MA, p. 25-55, 2005.

SCHILLING, D. A.; JAYARAMAN, V.; BARKHI, R. A review of covering problems in facility location. **Location Science**, v. 1, n. 1, p. 25–55, 1993.

SCOPUS, S. **Content coverage guide**. Amsterdam, Netherlands: Elsevier BV, 2016.

SILIPRANDE, M. D. **Localização de antenas de transmissão para internet wireless**: uma aplicação com abordagem genética para o município de Itaperuna. 2009. 90 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - UENF, Campos dos Goytacazes, 2009.

SOUSA FILHO, G. F.; PESSOA, B. J. S.; DIAS JR., J. J. L.; CABRAL, L. dos A. F. Uma arquitetura e ferramentas para problemas de localização de facilidades no setor público. In: VIII Simpósio Brasileiro de Sistemas de Informação. Anais ... São Paulo, p. 619-630, 2012.

STEVES, L. C. **Antenas**: Teoria básica e aplicações, São Paulo: McGra do Brasilw-Hill, 1980

SRINIVAS, M.; PATNAIK, L. M. **Genetic algorithms**: a survey. **Computer**, v. 27, n. 6, p. 17-26, 1994.

TANENBAUM, A. S. **Redes de Computadores**. 5. ed. Editora Prentice Hall Inc, 2011.

VIANNA, D. S.; ARROYO, J. E. A GRASP Algorithm for the Multi-Objective Knapsack Problem. In: XXIV INTERNATIONAL CONFERENCE OF THE CHILEAN COMPUTER SCIENCE SOCIETY, 24., 2004, Arica, Chile. **Anais...** 2004. p. 69-75, 2004.

YIN, ROBERT K. **Estudo de caso: planejamento e métodos**. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2001.

WHITLEY, D. A genetic algorithm tutorial. **Statistics and Computing**, v. 4, n. 2, p. 65-85, 1994.