

**Marlon Paolo Lima**

# **Planejamento Multiobjetivo de Redes WLAN utilizando Algoritmos Genéticos**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Minas Gerais para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

**Orientador: Prof. Dr. Eduardo Gontijo Carrano**

**Co-Orientador: Prof. Dr. Ricardo Hiroshi C. Takahashi**

Belo Horizonte  
Minas Gerais – Brasil  
2011

# Agradecimentos

A Deus, que me deu saúde para investir nesse desafio.

Agradeço ao professor Dr. Eduardo Gontijo Carrano, orientador deste trabalho, que sempre esteve disponível e pelas suas valiosas idéias, que foi o fator principal para o sucesso deste trabalho.

Ao professor Dr. Ricardo Takahashi, pelo apoio no desenvolvimento desta dissertação.

Agradeço aos meus pais José Cotta e Cida por abraçarem esta causa e darem o incentivo que precisei. Ao meu irmão Marconi pelo carinho.

À Suellen, pela compreensão e apoio em mais esta etapa da minha vida.

# Resumo

Este trabalho propõe uma ferramenta de planejamento de redes locais sem fio (*wireless local area networks* ou WLAN) baseada em um algoritmo genético multiobjetivo e heurísticas gulosas. A abordagem proposta consiste em duas etapas: projeto da estrutura da rede e alocação de canais. Na primeira fase, a quantidade, posicionamento e balanceamento de carga dos pontos de acesso (AP) são abordados de acordo com critérios de cobertura desejada, demanda de tráfego e capacidade de largura de banda dos AP. Na segunda etapa, o canal de cada AP é atribuído com o intuito de reduzir a interferência entre os pontos de acesso e aumentar a vazão (do inglês *throughput*) da rede.

Para avaliar a eficiência e robustez do algoritmo desenvolvido, foram realizados testes em quatro cenários possíveis, na qual é considerada a mobilidade dos usuários e variações no perfil de acesso. Os resultados demonstram que a ferramenta desenvolvida é útil para definir a quantidade e o posicionamento de pontos de acesso, além de sugerir um esquema de alocação de canais eficiente para as redes WLAN. Adicionalmente, o algoritmo genético (AG) desenvolvido emprega um mecanismo para balancear a carga dos pontos de acesso, de modo a aumentar o *throughput* geral da rede. Assim, o algoritmo proposto fornece uma aproximação do conjunto de soluções eficientes, resultando em redução nos custos de implementação do projeto, aumento de desempenho e melhor qualidade de serviço.

# Abstract

This work proposes a new tool for planning wireless local area networks (WLAN). This approach is based on a multiobjective genetic algorithm and greedy heuristics. It is composed of two steps: network structure design and channel assignment. In the first step, the quantity, position and load balance of the access points (AP) are planned taking into account the desired coverage, AP capacity and the traffic demand in the WLAN. In the second step, the channel of each access point is assigned in such a way that the network presents minimal interference and high throughput.

To evaluate the efficiency and robustness of the developed algorithm, tests were performed in four distinct scenarios, in which it is considered the user mobility and consumption profile variation. The results show that the developed tool is useful to define the optimal number and placement of the access points, and it is efficient with regard to channel allocation. Additionally, the GA employs a mechanism designed to balance the load of AP in order to increase the overall network throughput. Thus, the proposed algorithm delivers as the output an approximation of the efficient solution set. These solutions can be used to provide cost reduction and quality improvement of the solution chosen.

# Sumário

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>1</b>
1.1	Revisão da Literatura	2
1.2	Objetivos	4
1.3	Organização do Trabalho	5
<b>2</b>	<b>Redes WLAN</b>	<b>6</b>
2.1	Arquitetura do Padrão IEEE 802.11	6
2.2	Considerações no Planejamento de WLAN	8
2.2.1	Alocação de Canais e Interferência	9
2.2.2	Capacidade da Rede e Comportamento dos Usuários	10
2.2.3	Cobertura das Redes IEEE 802.11	12
2.3	Controle de Acesso ao Meio	14
<b>3</b>	<b>Otimização por Meio de Algoritmos Evolucionários</b>	<b>17</b>
3.1	Algoritmos Genéticos	17
3.1.1	Operadores Genéticos	20
3.2	Otimização de Problemas Multiobjetivo	22
3.3	Algoritmos Evolucionários Multiobjetivo	24
3.3.1	Objetivo	24
3.3.2	Histórico dos MOEA	25
3.3.3	Nondominated Sorting Genetic Algorithm II (NSGA-II)	27
<b>4</b>	<b>Caracterização do Problema</b>	<b>33</b>
4.1	Cobertura e Localização de Pontos de Acesso	33
4.2	Balanceamento de Carga	36
4.3	Atribuição de Canais em Redes WLAN	37
<b>5</b>	<b>Modelo Proposto</b>	<b>40</b>
5.1	Propagação das Ondas de Rádio	40
5.1.1	Modelo Log-distance	40
5.1.2	Nível de Recepção do Sinal (RSSI)	41
5.2	Planejamento de Redes WLAN	42
5.2.1	Problema de Cobertura e Localização de AP	42
5.2.2	Balanceamento de Carga	43
5.2.3	Distância Cliente - Ponto de Acesso	43

5.2.4	Atribuição de Canais.....	44
5.2.5	Restrições Técnicas .....	45
5.3	Modelagem Matemática .....	45
5.3.1	Problema 1 - Localização de AP e Balanceamento de carga em WLAN.....	45
5.3.2	Problema 2 - Atribuição de Canais em WLAN .....	47
<b>6</b>	<b>Abordagem para Resolução do Problema.....</b>	<b>49</b>
6.1	Representação das Soluções e População Inicial.....	49
6.2	Decodificação e Avaliação dos Indivíduos .....	52
6.3	Seleção dos Indivíduos .....	54
6.4	Cruzamento.....	54
6.5	Mutação.....	56
6.6	Avaliação dos Indivíduos.....	57
6.7	Penalização das Soluções Infactíveis .....	58
6.8	Atribuição de Canais.....	59
<b>7</b>	<b>Resultados e Discussões.....</b>	<b>62</b>
7.1	Cenários de Teste e Perfil dos Usuários .....	62
7.2	Parâmetros de Configuração dos Experimentos.....	64
7.2.1	Parâmetros de Entrada do Problema.....	64
7.2.2	Parâmetros de execução do algoritmo implementado.....	66
7.3	Análise dos Resultados.....	66
7.3.1	Variações no perfil de acesso .....	67
7.3.2	Cenário 1 .....	68
7.3.3	Cenário 2.....	71
7.3.4	Cenário 3.....	76
7.3.5	Cenário 4.....	80
7.3.6	Teste comparativo .....	84
<b>8</b>	<b>Considerações Finais.....</b>	<b>91</b>
8.1	Trabalhos futuros.....	92
	<b>Referências Bibliográficas .....</b>	<b>94</b>

# Lista de Figuras

Figura 1 - <i>Basic Service Set</i> .....	7
Figura 2 - ESS formada por duas BSS.....	8
Figura 3 - Canais de operação de uma WLAN.....	9
Figura 4 - CSMA/CA em funcionamento.....	15
Figura 5 - Fluxograma de um AG.....	19
Figura 6 - Fronteira Pareto.....	23
Figura 7 - Soluções hipotéticas do problema de decisão na compra de um carro.....	24
Figura 8 - Distribuição das soluções na fronteira de Pareto.....	25
Figura 9 - Fronteiras geradas pelo cálculo de dominância.....	29
Figura 10 - Procedimento do NSGA-II.....	31
Figura 11 - Cálculo de distância de multidão.....	32
Figura 12 - Área de cobertura de uma WLAN.....	33
Figura 13 - Rede WLAN desbalanceada.....	36
Figura 14 - Esquema de perdas e ganhos numa comunicação.....	42
Figura 15 - Representação de um indivíduo.....	51
Figura 16 - Criação de soluções iniciais.....	51
Figura 17 - Exemplo de um vetor de ativação de N bits.....	52
Figura 18 - Aproximação de centro nos dois indivíduos pais X e Y.....	55
Figura 19 - Distribuição polinomial usada para diferentes parâmetros n.....	57
Figura 20 - Configuração de WLAN / grafo de interferência.....	59
Figura 21 - Cenários de teste.....	63
Figura 22 - Soluções obtidas no cenário 1.....	69
Figura 23 - Alternativas de Projeto - cenário 1.....	71
Figura 24 - Soluções obtidas no cenário 2.....	72
Figura 25 - Alternativas de Projeto - cenário 2.....	74
Figura 26 - Soluções obtidas no cenário 3.....	76
Figura 27 - Alternativas de Projeto - cenário 3.....	78
Figura 28 - Soluções obtidas no cenário 4.....	80

Figura 29 - Alternativas de Projeto - cenário 4 .....	82
Figura 30 - Exemplo de execução do K-means.....	84
Figura 31 - Teste comparativo - cenário 1 .....	86
Figura 32 - Teste comparativo - cenário 2 .....	87
Figura 33- Teste comparativo - cenário 3 .....	89
Figura 34- Teste comparativo - cenário 4 .....	90



# Lista de Tabelas

Tabela 1 - Dados do problema .....	65
Tabela 2 - Parâmetros de execução do NSGA-II.....	66
Tabela 3 - Valores das Funções Objetivo - Cenário 1.....	70
Tabela 4 - Valores das Funções Objetivo - Cenário 2.....	73
Tabela 5 - Análise de Robustez - cenário 2 .....	75
Tabela 6 - Valores das Funções Objetivo - Cenário 3.....	77
Tabela 7 - Análise de Robustez - cenário 3 .....	79
Tabela 8 - Valores das Funções Objetivo - Cenário 4.....	81
Tabela 9 - Análise de Robustez - cenário 4 .....	83
Tabela 10 - Comparativo NSGA-II / K-means - cenário 1.....	86
Tabela 11 - Comparativo NSGA-II / K-means - cenário 2.....	88
Tabela 12- Comparativo NSGA-II / K-means - cenário 3.....	89
Tabela 13 - Comparativo NSGA-II / K-means - cenário 4.....	90

# Lista de Acrônimos

<b>AE</b>	Algoritmo Evolucionário
<b>AG</b>	Algoritmo Genético
<b>AGMO</b>	Algoritmo Genético Multiobjetivo
<b>AP</b>	<i>Access Point</i>
<b>BLX</b>	<i>Blend Crossover</i>
<b>BS</b>	<i>Base Station</i>
<b>BSS</b>	<i>Basic Service Set</i>
<b>BW</b>	<i>Bandwidth</i>
<b>CSMA/CA</b>	<i>Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance</i>
<b>DS</b>	<i>Distribution System</i>
<b>DSATUR</b>	<i>Degree of saturation</i>
<b>ESS</b>	<i>Extended Service Set</i>
<b>IEEE</b>	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
<b>ISM</b>	<i>Industrial, Scientific, and Medical</i>
<b>MAC</b>	<i>Media Access Control</i>
<b>Mbps</b>	<i>Megabits per second</i>
<b>MOGA</b>	<i>Multiobjective Genetic Algorithm</i>
<b>MOEA</b>	<i>Multiobjective Evolutionary Algorithm</i>
<b>NPGA</b>	<i>Niched Pareto Genetic Algorithm</i>
<b>NSGA-II</b>	<i>Nondominated Sorting Genetic Algorithm - II</i>
<b>PAES</b>	<i>Pareto Archived Evolution Strategy</i>
<b>PCC</b>	Problema de Cobertura de Conjuntos
<b>PMO</b>	Problema Multiobjetivo
<b>RSSI</b>	<i>Received Signal Strength Indicator</i>
<b>SBX</b>	<i>Simulated Binary Crossover</i>
<b>SIR</b>	<i>Signal to Interference Ratio</i>
<b>SPEA</b>	<i>Strength Pareto Evolutionary Algorithm</i>
<b>VEGA</b>	<i>Vector Enabled Genetic Algorithm</i>
<b>WLAN</b>	<i>Wireless Local Area Network</i>

# 1 Introdução

A crescente busca por mobilidade, combinada à necessidade de se utilizar redes com baixo custo estrutural e de acesso, justificam o aumento de atenção que as redes locais sem fio (do inglês *Wireless Local Area Networks* ou WLAN) têm recebido recentemente. Uma WLAN do tipo ESS (*Extended Service Set*) é um conjunto de dois ou mais pontos de acesso (*access points* ou AP) interconectados em uma mesma rede local, que são vistos como uma única rede por uma estação cliente. O intuito dessa configuração é ampliar o alcance e cobertura da rede. Nesse tipo de rede, cada cliente precisa se associar a um AP para usufruir dos recursos disponíveis no ambiente.

Embora muitas vezes negligenciada, a localização dos AP tem relação direta com o desempenho dessas redes, uma vez que afeta o alcance e qualidade dos serviços oferecidos aos usuários. Por sua vez, a alocação excessiva de pontos de acesso, além de conduzir a um alto custo de instalação, geralmente leva à degradação do desempenho da rede, devido aos problemas de interferência causados pelo limitado espectro de frequência disponível nas WLAN [29],[38],[63]. Assim, os dispositivos concentradores devem estar localizados de modo a garantir a cobertura e o desempenho da rede, ao mesmo tempo em que minimizam a interferência entre os APs.

O balanceamento de carga nas redes IEEE 802.11 afeta a qualidade de serviço e a taxa de transferência (do inglês *throughput*) da rede [7],[35]. Na prática, uma quantidade elevada de usuários tende a se reunir em uma mesma área [5]. Tal comportamento, combinado com o aumento da demanda por diferentes serviços, cria uma carga desequilibrada na rede, o que irá comprometer o seu desempenho global. Assim, torna-se importante distribuir adequadamente os usuários entre os AP, com o intuito de maximizar a intensidade de sinal disponibilizado aos clientes e melhorar a distribuição da carga na rede.

Os aspectos citados nessa introdução fazem do planejamento de redes locais sem fio um problema de otimização complexo, onde múltiplos critérios de projeto e restrições técnicas devem ser considerados. A aplicação de métodos exatos para a solução desse problema não é uma alternativa viável, tendo em vista o alto custo computacional que seria demandado por estes métodos [36],[38],[56]. Desta maneira, métodos baseados em meta-heurísticas podem ser empregados para fornecer soluções próximas da ótima com maior rapidez e flexibilidade. Os Algoritmos Genéticos (AG), por exemplo, apresentam essas características e têm sido utilizados para solução de problemas de redes

sem fio [3],[35],[56]. Além disso, os AGs são mais escaláveis, podendo ser adaptado para problemas de diferentes dimensões. Estes algoritmos empregam os princípios de evolução das espécies para melhorar sucessivamente (evolução) a qualidade de uma solução em um problema de otimização [37],[39].

Esta dissertação propõe a aplicação de um algoritmo genético multiobjetivo para o planejamento de WLAN. Três critérios de projeto são considerados: minimização do número de AP, minimização do desbalanceamento da rede e maximização da intensidade de sinal presente nas estações clientes. Além disso, as soluções obtidas devem obedecer a três restrições: cobertura mínima, disponibilidade de canais para operação e capacidade de largura de banda do AP. O algoritmo proposto emprega operadores desenvolvidos para o problema, com o objetivo de aprimorar a sua convergência. Espera-se que o AG seja capaz de encontrar soluções adequadas para diferentes cenários de projeto.

## 1.1 Revisão da Literatura

A maioria dos trabalhos existentes para planejamento de WLAN tem focado apenas na cobertura de sinal do ponto de acesso. Esses estudos não avaliam elementos chave, como a demanda de tráfego requerida, densidade de usuários, balanceamento de carga e atribuição de canais. Neste sentido, Wright [67] utiliza o algoritmo *Simplex Nelder-Mead* para encontrar a quantidade e localização ideal de pontos de acesso necessários para cobrir uma área. No algoritmo proposto, a estimativa da distância entre a estação cliente e o AP é baseada na potência do sinal recebido em cada nó da rede, representados por receptores virtuais, dispostos em uma grade de pontos no ambiente simulado. Assim, o algoritmo busca minimizar uma função objetivo não linear em um espaço multidimensional, respeitando os limites mínimos de níveis de sinal especificados. A solução ótima obtida, no caso a cobertura ideal, é a maior relação entre os pontos cobertos e o total de pontos dispostos na rede.

Fruhwith [23] propõe uma ferramenta que calcula a melhor disposição dos AP, inserindo pontos de demanda em uma grade bidimensional, cobrindo uma área determinada. O algoritmo tenta encontrar áreas para instalação de AP que alcançam o maior número de pontos de demanda. Para tal, a solução desenvolvida pelo autor simula a propagação de ondas de cada Access Point, onde é possível especificar um fator de atenuação para obstáculos no ambiente. Uma solução inicial é gerada restringindo as possíveis áreas de interseção de cobertura, obedecendo à restrição de cobertura total do

ambiente. Depois, para minimizar o número de AP instalados, o autor utiliza o método *Branch and Bound*, restringindo a movimentação destes dispositivos. Mateus et al. [43] desenvolveram um modelo para otimizar a cobertura de um limitado número de pontos de acesso em uma rede WLAN baseado em Programação Linear Inteira (PLI). Neste trabalho, os autores tratam duas questões no projeto de WLAN: determinar o melhor posicionamento dos dispositivos concentradores para maximizar o nível de sinal nos pontos de demanda e a correta atribuição dos canais de frequência, buscando minimizar a interferência entre os pontos de acesso da rede.

Nos ambientes de WLAN com concentração elevada de usuários, é necessário propor algum mecanismo capaz de garantir o balanceamento de carga da rede e, conseqüentemente, a qualidade de serviço oferecida aos usuários. Assim, Gomes [27] descreve um esquema para posicionamento de pontos de acesso em uma WLAN que introduz propriedades de sobrevivência da rede em caso de falhas e um mecanismo de balanceamento de carga, aplicado para melhorar a qualidade de serviço. Neste trabalho são consideradas mudanças nos níveis de potência e realocação dos canais de frequência dos AP. A demanda de tráfego e a densidade de usuários vêm sendo estudadas no projeto de redes celulares há bastante tempo. Porém, as técnicas adotadas nessas redes devem ser adaptadas para aplicação em redes IEEE 802.11, devido às diferenças nos objetivos de projetos. Bejerano e Han [7] propõem uma técnica que balanceia a carga de um AP, reduzindo o tamanho das células dos pontos congestionados, que é conceitualmente similar aos métodos chamados *cell breathing* empregados em redes celulares.

Em [56], Scully e Brown apresentam um algoritmo genético mono objetivo que balanceia a carga da rede, otimizando o desempenho das WLAN em áreas de congestionamento de usuários. Os autores comparam o desempenho do algoritmo criado com os esquemas de balanceamento atualmente em uso em WLAN e relatam que obtiveram uma melhoria significativa no *throughput* dessas redes. No entanto, a proposta dos autores é aplicada somente a WLAN já em operação, ou seja, quando a posição dos AP já está definida, não sendo adequada para o planejamento de redes 802.11. Fatores como quantidade, localização e canais de operação dos pontos de acesso não foram tratados no artigo. Além disso, o artigo supracitado aborda um padrão de WLAN já obsoleto (IEEE 802.11b), cujo desempenho está aquém das necessidades atuais dos usuários.

Por sua vez, o problema de atribuição de canais nas redes IEEE 802.11 já foi abordado em alguns outros trabalhos. Leung e Kim [36] comprovam que a alocação de canais nas redes 802.11 é um problema NP-completo e propõem uma heurística que busca soluções para a reutilização dos canais em

redes nos AP da WLAN, levando em conta a carga de tráfego de cada AP. Mishra et al. [47] consideram a possibilidade de utilizar canais parcialmente sobrepostos na atribuição de frequências. Os autores utilizam um índice de sobreposição entre os canais disponíveis na faixa de frequência de 2,4 GHz, atribuindo pesos que representam a porcentagem de usuários presentes na área de interferência associada àquele canal. Um dos problemas desta abordagem é que a sobreposição de canais gera interferência na transmissão de dados, o que pode levar a perda de pacotes e conseqüentemente, queda no desempenho da rede. Em Mahonen et al. [38], um algoritmo guloso baseado em técnicas de coloração de vértices é proposto. Este algoritmo tem como objetivo encontrar uma atribuição de canais que maximize a quantidade de pontos de acesso vizinhos que utilizam canais diferentes, reduzindo assim a interferência na rede.

## 1.2 Objetivos

O objetivo dessa dissertação é desenvolver uma ferramenta de planejamento potencialmente capaz de encontrar o posicionamento ótimo de AP e realizar o balanceamento de carga da rede WLAN, minimizando a interferência entre pontos de acesso. As soluções obtidas devem ser capazes de satisfazer as restrições técnicas do problema, como cobertura da rede, intensidade de sinal mínima em cada estação cliente, tráfego previsto em uma área de serviço, capacidade do ponto de acesso, níveis de interferências suportados e limite de canais disponíveis. Esta dissertação aborda o padrão IEEE 802.11g por se tratar do padrão de rede WLAN mais utilizado atualmente.

A ferramenta de projeto proposta para execução de tal tarefa é algoritmo evolucionário multiobjetivo combinado com heurísticas gulosas. Cada instância a ser tratada pelo algoritmo é definida por um conjunto de parâmetros, como por exemplo: posição em que os AP podem ser alocados, canais de frequência disponíveis, localização e demanda aproximada dos clientes e níveis de potência dos rádios. Adicionalmente, o mecanismo de projeto também deve ser capaz de levar em conta o efeito da variação da densidade de usuários, que ocorre na maioria dos ambientes cobertos por uma WLAN. Por fim, as soluções encontradas pelo AG devem ser robustas a ponto de suportar a mobilidade dos usuários e variação do perfil de acesso à rede ao longo do tempo.

## 1.3 Organização do Trabalho

Essa dissertação está estruturada em sete capítulos. O capítulo 2 aborda as considerações necessárias para o planejamento de uma rede local sem fio, contendo uma revisão bibliográfica sobre os fundamentos das redes IEEE 802.11, os principais aspectos que influenciam um projeto de WLAN, além de critérios de qualidade de serviço. Os conceitos dos algoritmos genéticos são discutidos no Capítulo 3, explorando sua estrutura, operadores, métodos de seleção dos indivíduos e os parâmetros genéticos que podem ser configurados na solução dos objetivos deste trabalho. Também é apresentada neste capítulo a estrutura do algoritmo genético multiobjetivo NSGA-II. No Capítulo 4, discute-se a caracterização dos problemas de cobertura, balanceamento de carga e atribuição de canais em redes WLAN, além da modelagem matemática adotada para a resolução destes problemas. No Capítulo 5, são discutidas, em detalhes, as particularidades do algoritmo evolucionário multiobjetivo desenvolvido. Essa discussão abrange a representação e avaliação de soluções, tipos de operadores genéticos empregados, além das heurísticas desenvolvidas. Os resultados obtidos por meio da aplicação do AG nos diferentes cenários propostos são apresentados no capítulo 6, na qual é realizada uma análise de repetibilidade e robustez das soluções propostas. Por fim, o capítulo 7 conclui o trabalho, apresentando as contribuições alcançadas e possíveis extensões do trabalho aqui desenvolvido.

## 2 Redes WLAN

Uma rede WLAN pode ser definida como uma tecnologia de transmissão de dados em redes locais por meio de ondas de radio. Essas redes são muito utilizadas para promover acesso à Internet em *hotspots* (locais de acesso à WLAN como cafés e hotéis), escritórios e residências, além de oferecem grandes vantagens aos seus usuários como mobilidade, conforto e praticidade. Desde que foi padronizado pelo IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) em 1997, as redes 802.11 se tornaram muito populares e continuam sendo desenvolvidas por diversos grupos de trabalho, que têm como objetivo propor melhorias e novas aplicações.

As redes locais sem fio são popularmente conhecidas como Wi-Fi, e esse termo vem do programa de certificação mantido pela *Wi-Fi Alliance*, uma associação de fabricantes de dispositivos que implementam o padrão IEEE 802.11. Existem diversos padrões para tecnologia de LAN sem fio, entre eles 802.11a, 802.11b, 802.11g e 802.11n, sendo os subpadrões G e N são os mais utilizados atualmente. Estes padrões se diferem na largura de banda, frequência de operação e na tecnologia utilizada para transmissão dos dados. Atualmente essas redes oferecem um desempenho próximo das redes Ethernet, podendo chegar a 600 Mbps no melhor caso.

Devido aos benefícios oferecidos pelas redes locais sem fio, grandes projetos de WLAN estão sendo implementados no Brasil. Locais como orlas de praias, centros históricos, praças ou mesmo em cidades inteiras estão sendo cobertas pelo sinal das redes WLANs. Esses projetos são motivados pela facilidade de conexão das pessoas com a Internet, por abranger grandes áreas e devido ao seu baixo custo estrutural, quando comparado às redes cabeadas. Assim, essas grandes instalações de WLAN podem abrir novas possibilidades para o desenvolvimento de aplicações móveis.

### 2.1 Arquitetura do Padrão IEEE 802.11

Uma rede WLAN típica é constituída de um ponto de acesso e várias estações cliente ligadas a esse AP, utilizando um mesmo canal. Essa configuração forma o conjunto básico de serviços (BSS) da arquitetura IEEE 802.11 e pode ser vista na Figura 1, retirada de [21]. Em um BSS (do inglês *Basic Service Set*) toda comunicação é realizada através do ponto de acesso, que é um ponto estacionário e central do



tráfego na rede. Assim, as estações cliente estão sob o controle direto do AP, que determina quando um cliente poderá transmitir ou receber dados. Os clientes de uma WLAN comunicam-se na rede por meio de dispositivos como notebooks, smartphones ou PCs, equipados com interface de rede 802.11. Essa configuração de rede pode ser utilizada para atender áreas pequenas, como residências e escritórios.

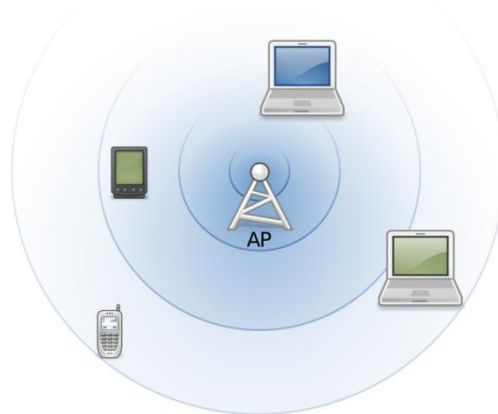


Figura 1 - *Basic Service Set*

Uma WLAN BSS impõe limites na mobilidade de seus usuários, devido a restrições no alcance do dispositivo concentrador da rede. Assim, a extensão dessa rede sem fio será definida pela potência e localização do ponto de acesso, além do tipo de antena utilizada na propagação do sinal. Essas características tornam uma BSS inadequada para ser aplicada em redes WLAN de médio e grande porte.

Devido a essas limitações, o IEEE criou o modo ESS (*Extended Service Set*) ou conjunto estendido de serviços, que consiste em um conjunto de redes BSS interconectadas em um sistema de distribuição (Figura 2 [21]). Utilizando uma WLAN ESS é possível ampliar de forma significativa a área de cobertura de uma rede local sem fio. Assim, os usuários dessa rede poderão se movimentar entre as BSS, sem perda de conexão. Este processo é conhecido como *handoff* ou *handover* e é executado pelos AP da rede de forma transparente para os usuários.

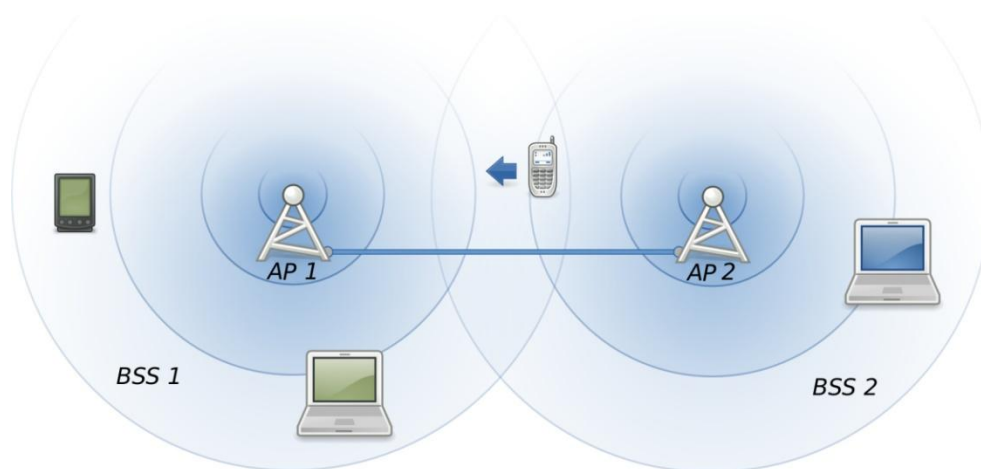


Figura 2 - ESS formada por duas BSS

Um sistema de distribuição ou DS (do inglês *Distribution System*), por sua vez é um *backbone* que interliga os pontos de acesso de uma WLAN, possibilitando a comunicação e movimentação dos clientes situados em diferentes BSS. Apesar da maioria das transmissões entre os AP de uma ESS serem realizadas através de um meio guiado, existem DS formados por redes sem fio.

## 2.2 Considerações no Planejamento de WLAN

Planejar de forma adequada uma LAN sem fio é uma tarefa complexa e necessária. A implantação de uma WLAN vai além da questão de identificar onde estão os usuários da rede e conectá-los aos AP. Conforme mencionado na seção 2.1, as redes locais sem fio podem ser estendidas, oferecendo mobilidade aos seus clientes através do processo de *handoff*. No entanto, os benefícios desse recurso estão associados a um elevado preço, a dificuldade de obter projetos de redes WLAN eficientes a um custo razoável.

Cada rede local sem fio tem sua particularidade, no que diz respeito à sua dimensão, concentração de usuários e barreiras. Esses aspectos tornam o planejamento de cada WLAN único em muitos casos, exigindo um levantamento minucioso do ambiente e suas necessidades. Neste capítulo serão abordados fatores importantes que devem ser considerados no planejamento de uma WLAN como interferências, capacidade da rede e limitações de cobertura.

## 2.2.1 Alocação de Canais e Interferência

O FCC (*Federal Communications Commission*) é o órgão regulador das telecomunicações nos Estados Unidos responsável por criar regras relacionadas ao modo de operação das WLAN. O FCC especificou que as WLAN podem utilizar as bandas ISM (*Industry, Scientific and Medical Band*), que são bandas não licenciadas. A maior vantagem no uso dessa banda está relacionada ao fato de não haver custos com licenciamento. Essa característica foi fundamental para o crescimento das redes IEEE 802.11. No entanto, o fato da banda ser não licenciada também traz desvantagem, já que várias redes sem fio que operam na faixa ISM estão competindo pela mesma banda e interferindo entre si.

No Brasil, a banda ISM em que as redes WLAN de 2,4 GHz operam é dividida em 11 canais, cada um com largura de banda de 22 MHz. Embora todos os 11 canais estejam disponíveis para alocação, existem no máximo três canais (1, 6 e 11) que não causam interferência entre si. Esses três canais são chamados de não sobrepostos, devido à existência de um espaço de frequência de 3 MHz entre eles (vide Figura 3, adaptada de [25]).

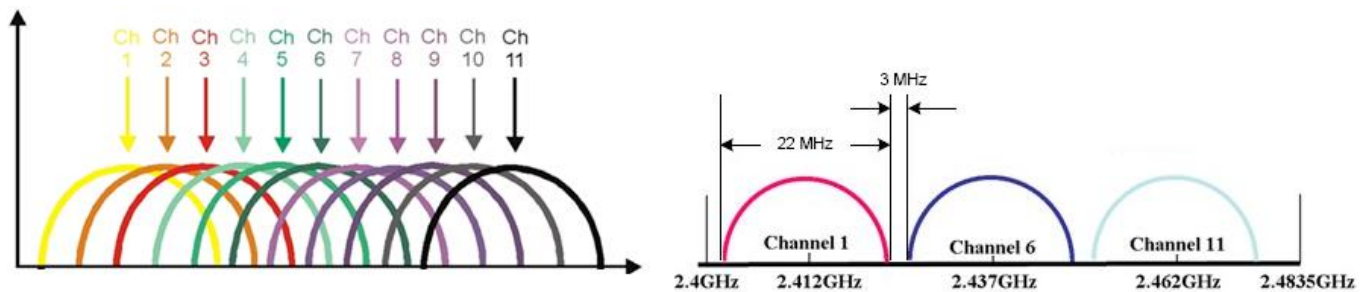


Figura 3 - Canais de operação de uma WLAN

Nas redes *wireless*, a interferência diz respeito a perturbações causadas por outras fontes de rádio-frequência em um mesmo ponto. Assim, dois tipos de interferência podem incidir sobre as redes 802.11, a interferência de canais adjacentes, já mencionada anteriormente, e a interferência co-canal. Na interferência co-canal, o sinal interferente é irradiado na mesma frequência que o sinal desejado. Este tipo de interferência ocorre quando equipamentos *wireless*, situados uns próximos dos outros, utilizam o mesmo canal. A maior incidência deste problema é notada em WLAN ESS saturadas ou em redes mal planejadas.

Os efeitos da interferência são indesejáveis em qualquer sistema sem fio e podem levar a perda considerável de desempenho da rede ou até a queda momentânea da conexão, nos casos em que o nível de interferência seja muito elevado [29]. O nível de interferência em uma WLAN é mensurado pelo SIR

(do inglês *Signal to Interference Ratio*), sendo que o ideal é manter o valor desta relação o mais alto possível. Isto significa que a intensidade do sinal recebido do AP pelo cliente deve ser suficientemente maior que o sinal recebido de outro ponto de acesso operando no mesmo canal. Caso haja muita interferência na rede, colisões e esperas para transmissão poderão ocorrer, reduzindo drasticamente a velocidade de uma LAN sem fio.

O correto planejamento dos canais de operação é primordial no projeto de uma WLAN ESS para minimizar ou eliminar o problema de interferência de canais. Contrariamente, muitos projetos de rede local sem fio não dão a devida importância a essa parte do planejamento, porque normalmente a rede “funciona”, mesmo que com baixo desempenho, em vários arranjos de frequência. Essa degradação do desempenho não é, em muitos casos, percebida de imediato, pois as interferências podem ocorrer aleatórias no tempo, dificultando sua identificação [54]. Porém, quando são utilizadas aplicações em tempo real como VoIP ou videoconferências, que não suportam retransmissões de pacotes, este problema torna-se visível e crítico, podendo se tornar inviável o uso do recurso.

Uma característica das redes WLAN ESS com uma elevada concentração de usuários é a necessidade de se agregar uma maior quantidade de pontos de acesso para atender as demandas. Este fator obriga os projetistas de rede a reutilizar os canais de operação não sobrepostos na WLAN. Como não é possível eliminar as interferências nesses ambientes, o objetivo então se torna reduzir ao máximo sua ocorrência na rede.

### **2.2.2 Capacidade da Rede e Comportamento dos Usuários**

A capacidade de transmissão de dados dos pontos de acesso é um aspecto extremamente importante no projeto de uma WLAN. À medida que o número de usuários de redes locais sem fio cresce, a demanda por serviços que consomem elevada largura de banda também aumenta. Sabe-se que a capacidade AP da rede sem fio é limitada, sendo que a largura de banda ou BW (do inglês *bandwidth*) das WLAN atuais podem variar de 54 Mbps a 600 Mbps, dependendo do tipo de equipamento e padrão adotado. Essa largura de banda disponível deve ser distribuída entre todos os dispositivos que estão conectados a essa rede.

É preciso destacar que a velocidade do link de acesso à Internet é geralmente bem menor que a BW dos pontos de acesso de uma WLAN, tornando-se um gargalo para diversas aplicações clientes. Nessas condições, a maneira como os recursos da rede são compartilhados gera um impacto direto no desempenho dos clientes e também na qualidade do serviço oferecido pela rede. Assim, é sempre

desejável que a largura de banda de uma rede seja distribuída de forma mais justa possível. Contudo, isso não significa necessariamente uma distribuição igual dos recursos, já que cada usuário da rede tem comportamento e necessidades diferentes.

Em estudos realizados por Balachandran et al. [5] e Balazinska [6], observou-se que a carga do tráfego nos pontos de acesso não depende inteiramente da quantidade de usuários que estão conectados a um mesmo AP. O tráfego total de uma WLAN também depende do nível de atividade de seus usuários e seus comportamentos. Essa exigência de banda prevista para cada usuário da rede pode ser mensurada por meio de observações sobre o perfil dos clientes da rede e padrões de tráfego nas WLAN existentes [5]. Assim, para desenvolver um modelo que estime o tráfego total de uma WLAN, é necessário prever a exigência de banda dos clientes da rede, tendo em vista que alguns usuários são mais ativos que outros. Este modelo será abordado de forma mais detalhada na seção 4.2.

Para um correto planejamento de uma *Wireless LAN*, também são necessárias informações concretas sobre o número potencial dos usuários da rede, suas possíveis localizações e as áreas onde se deseja oferecer a rede sem fio com boa intensidade de sinal. Essas informações são essenciais para estimar a taxa de dados potencial, a capacidade média de carga em cada AP, além do número de pontos de acesso necessários para atender essa demanda. Os dados sobre o posicionamento dos clientes são úteis para definir a correta disposição dos pontos de acesso e as associações cliente - AP, de modo que os usuários obtenham um nível de sinal aceitável.

Outra consideração relevante em um projeto de rede 802.11 é a flutuação do tráfego durante determinadas horas do dia. Alguns pesquisadores observaram em [6], que o volume do tráfego da rede e da distribuição dos usuários na rede varia conforme o horário e tipo de ambiente. Essa variação deve ser considerada, já que um dos objetivos das redes sem fio é justamente oferecer mobilidade aos usuários. Assim, para desenvolver um projeto de WLAN eficiente é fundamental, após estarem definidas as posições para instalação dos equipamentos, a realização de testes de estabilidade e robustez. Esses testes podem ser realizados por meio de simulações, modificando parâmetros originais utilizados na fase de planejamento como a demanda de tráfego, o posicionamento e concentração dos usuários.

É muito comum que com as alterações no perfil de acesso dos usuários, seja pelas taxas de transferência ou pelas movimentações, ocorra um desequilíbrio de carga entre os pontos de acesso da rede. Mesmo em uma WLAN bem configurada, alguns AP irão experimentar períodos de alta demanda durante algum tempo. Nos testes realizados em [5], os autores constataram que durante esses

picos de tráfego, um ou dois pontos de acesso da rede foram muito afetados. Com isso todos os usuários que estavam conectados a esses AP também foram prejudicados. Por este motivo, alguns fabricantes implementam em seus pontos de acesso a solução de balanceamento de carga constante, permitindo assim que o volume de tráfego sobre esses concentradores da rede seja aliviado. Esse trabalho também trata a reassociação de clientes a pontos de acesso, durante flutuações da rede, o que será abordado na seção 7.3.1.

### **2.2.3 Cobertura das Redes IEEE 802.11**

Atualmente é comum encontrarmos grandes redes locais sem fio em operação. Essas redes cobrem áreas extensas como aeroportos, campus universitário, *Shoppings Centers* e até cidades inteiras. Conforme mencionado anteriormente, um único ponto de acesso não é capaz de cobrir estes ambientes, sendo necessária a interligação de vários AP para atingir este objetivo. Assim, a área de serviço de uma *Wireless LAN* é determinada pela área de cobertura de um ponto de acesso ou pela união das áreas de cobertura de vários AP, no caso de uma ESS. Assim a extensão de uma área de serviço irá variar de acordo com a quantidade de pontos de acesso, a potência de irradiação, o tipo e o ganho da antena empregada e com o ambiente [26].

Quando se planeja instalar uma rede 802.11 em um ambiente, é necessário disponibilizar pontos de acesso mesmo em locais onde haverá poucos clientes. Essa é uma exigência essencial quando se deseja cobrir toda uma área de serviço. O fato dos usuários da WLAN serem móveis intensifica esta necessidade, já que os clientes podem eventualmente migrar para esses locais pouco prováveis. Além disso, o nível do sinal recebido pelos clientes que se situam nestas áreas deve ser suficiente para que eles possam usufruir, com qualidade, dos recursos da rede. Apesar de necessária, estas restrições certamente aumentam o custo de implantação de uma rede sem fio, justificando portanto, a aplicação de um esquema eficiente de posicionamento de AP.

Como uma medida de disponibilidade e cobertura de sinal, a intensidade do sinal recebido (RSSI - *Received Signal Strength Indicator*) nos dispositivos *wireless* da rede deve ser considerada no modelo do projeto. O RSSI afeta o desempenho de uma transmissão, sendo que quanto menor a sua intensidade, menor a velocidade de operação deste com o ponto de acesso [25]. Isto se deve ao fato do AP alterar a modulação dos dados para transmissão quando a intensidade de sinal da rede degrada, já que técnicas de modulação mais simples implicam em menos falhas de transmissão com baixo RSSI. Assim, o objetivo deste mecanismo é evitar erros durante o envio de dados, pois retransmissões de

pacotes são custosas para rede. Além disso, o RSSI deve estar acima do limite recomendado pelos fabricantes para que possa ocorrer a transmissão dos dados.

A cobertura de uma WLAN está diretamente relacionada ao tipo de antena utilizada nos dispositivos concentradores da rede. As antenas estão entre os elementos mais críticos no desempenho das redes sem fio, pois é através delas que os sinais de radiofrequência são transmitidos e recebidos. Cada categoria de antena possui diferentes características e aplicações. De modo geral, dois tipos de antenas podem ser empregados em redes WLAN: as omni-direcionais e as direcionais. No entanto, as antenas omni-direcionais são mais utilizadas por atender de maneira uniforme as necessidades de cobertura do ambiente. Essa antena irradia o sinal em torno do seu eixo, em um feixe horizontal de 360°, cobrindo grandes áreas.

Um dos fatores que mais influencia na cobertura e no planejamento de uma WLAN é o ganho de uma antena. Esse ganho é expresso em dBi, que significa decibéis em relação a um irradiador isotrópico. Nesse caso, o irradiador isotrópico seria uma antena hipotética, que propaga seu sinal em todas as direções, no formato de uma esfera [25],[26]. Assim, qualquer variação nesse formato de irradiação proporciona um alcance maior do sinal, resultando em ganhos na transmissão. À medida que o ganho da antena aumenta, seu feixe de irradiação de sinal fica cada vez mais estreito, de modo que antenas com maior ganho são capazes de propagar o sinal a distâncias maiores do que antenas de baixo ganho com a mesma potência de entrada.

As antenas omni-direcionais de alto ganho oferecem maior cobertura horizontal, no entanto a área de cobertura vertical sofre uma grande redução. Entretanto, em uma WLAN indoor, na qual os clientes não são fixos, pode ser impossível prever onde eles estarão. Assim, a antena deve, idealmente, irradiar o sinal em todas as direções. Neste caso, antenas muito diretivas tornam-se inadequadas. A maioria das antenas omni-direcionais utilizadas em redes locais sem fio indoor possuem ganhos variando de 2 a 7 dBi.

Apesar das redes WLAN que operam na faixa ISM, de forma geral, serem isentas de adquirir licenças para operação, existem algumas normas que devem ser respeitadas para implantação dessas redes. A ANATEL (órgão no Brasil equivalente ao FCC) estabeleceu que os equipamentos de WLAN que operam na faixa de frequência de 2,4 GHz, em cidades com mais de 500 mil habitantes, não podem irradiar o sinal com uma potência superior a 400mW ou 26 dBm. Esse cálculo é determinado pela potência efetiva irradiada ou EIRP (do inglês *Equivalent Isotropically Radiated Power*) do equipamento e é feito utilizando a equação 2.1.

$$EIRP = P_t - L_c + G_a \quad (2.1)$$

Onde a  $EIRP$  e  $P_t$  (potência do transmissor) é representada em dBm, as perdas causadas por cabos e conectores ( $L_c$ ) em dB, e o ganho da antena ( $G_a$ ) é expresso em dBi.

A potência da maioria dos pontos de acesso comercializados no Brasil varia de 23 a 250 mW. Neste trabalho, será considerada a utilização de AP com potência de 100 mW, de modo que a EIRP não ultrapasse 26 dBm. Devido às restrições existentes, é preciso ter cautela na escolha dos equipamentos para o correto planejamento de uma WLAN, no que diz respeito à potência dos AP e ganhos de antenas empregadas na transmissão. Sabe-se que esses limites impostos pela ANATEL são importantes para reduzir os problemas de interferência existentes nas bandas ISM [54].

## 2.3 Controle de Acesso ao Meio

As estações sem fio em uma rede WLAN lidam com um meio de transmissão compartilhado, no qual somente uma estação pode ocupar esse meio em um dado instante. Se mais de um cliente transmitir dados em um mesmo canal simultaneamente, uma colisão ocorrerá e o pacote com os dados irá se corromper. Conforme mencionado anteriormente, em muitas configurações de ESS é necessária a reutilização dos canais não interferentes entre si. Assim, as redes locais sem fio devem lidar com a possibilidade de ocorrer colisões em suas transmissões.

O método de acesso ao meio empregado nas redes padrões WLAN e *Ethernet* são parecidos. Ambas utilizam um protocolo de controle de acesso ao meio (MAC) denominado CSMA (*Carrier Sense Multiple Access*). No CSMA, antes de uma estação transmitir os dados ela “ouve” o meio, por meio de sensoramento da portadora, tentando evitar uma possível colisão de pacotes na WLAN. Caso o meio esteja ocupado, a estação aguarda um pequeno intervalo de tempo aleatório antes de tentar enviar novamente. No entanto, utilizando apenas este método, não é possível prevenir completamente as colisões em uma rede [54].

No CSMA puro, se duas estações tentarem enviar dados no mesmo instante, elas irão “ouvir” o meio e poderão concluir que não estão sendo realizadas transmissões naquele momento. Assim, ambas começarão a transmitir seus dados, o que irá ocasionar colisões de pacotes na rede, desperdiçando assim, largura de banda. Nas redes cabeadas, o método de acesso mais popular é o CSMA/CD (com detecção de colisão), que não pode ser usado nas redes WLAN, já que existe uma grande dificuldade



em detectar colisões em redes sem fio. Nas redes Ethernet, todos os nós podem “ouvir” uns aos outros, o que é uma exigência do método com detecção de colisão. Porém, em redes sem fio, isso não é possível, uma vez que pode haver estações consideravelmente distantes umas das outras.

A fim de resolver esses problemas, o IEEE 802.11 adotou um método mais eficiente chamado CSMA/CA (do inglês *Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance*), com o objetivo de reduzir a probabilidade de colisões entre as estações da rede [25]. Nesse método, a estação que irá transmitir “escuta” o meio e se ele estiver livre, a estação solicita uma reserva do meio para transmissão, enviando um pedido ao ponto de acesso denominado RTS (*request to send*) para enviar os dados. O ponto de acesso então retorna um CTS (*clear to send*) indicando que a estação cliente poderá transmitir os dados.

Uma vez que a estação cliente não tem como saber se houve ou não problemas durante o envio dos dados, uma confirmação ACK (do inglês *Acknowledgment*) é enviada pelo AP sempre que o mesmo recebe um pacote sem erros. Se o transmissor não receber o ACK do destino, ele conclui que houve problemas no envio dos dados e retransmite o pacote. Este esquema pode ser visualizado na Figura 4. Esses quadros para coordenar as transmissões dos clientes de uma WLAN são curtos, o que reduz a probabilidade de colisões durante o envio deles.

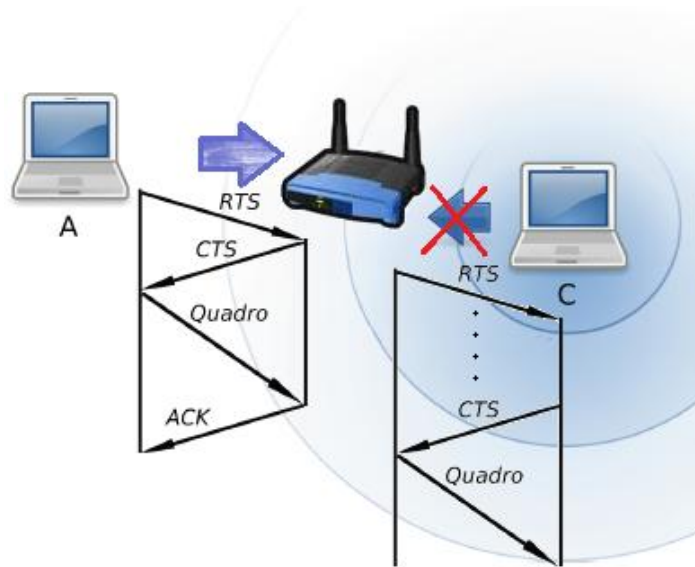


Figura 4 - CSMA/CA em funcionamento

Em redes 802.11 ESS com muitos clientes, a disputa pelo acesso ao meio é grande, já que muitos usuários geralmente precisam enviar grandes volumes de dados ao mesmo tempo. Neste sentido, o protocolo CSMA/CA torna-se uma forma eficaz de administrar e ordenar o tráfego dos pacotes

transmitidos. Por sua vez, esse protocolo tem impacto relevante no desempenho global da WLAN, pois reduz a ocorrência de colisões. Sabe-se que uma colisão de pacotes é muito custosa para a rede, principalmente em aplicações multimídia, já que haverá a necessidade de retransmissão do pacote corrompido. Entretanto é conveniente ressaltar que o uso do CSMA/CA irá gerar um tráfego extra na rede, devido ao tráfego dos pacotes ACK. Assim, em WLANs caseiras, com poucos equipamentos, se torna vantajoso desativar este recurso.

# 3 Otimização por Meio de Algoritmos Evolucionários

Conceitualmente, os algoritmos evolucionários (AE) seriam técnicas computacionais baseadas no processo de evolução natural dos seres vivos. Essa evolução fundamenta-se na teoria que, ao longo de gerações, os seres que são mais adaptados em uma população têm maiores chances de sobreviver e gerar melhores descendentes do que os seres menos aptos, que são gradativamente eliminados pelo processo da seleção natural. O surgimento de novos métodos estendeu esse conceito e, atualmente, são aceitas como algoritmos evolucionários as meta-heurísticas baseadas em inspirações naturais que são empregadas para a solução de problemas reais. Na maior parte dos casos, esses métodos são dedicados à solução de problemas de otimização e aprendizado de máquina.

Os algoritmos evolucionários têm sido amplamente explorados em problemas de otimização mono e multiobjetivo por serem fáceis de ser adaptados a problemas de diferentes naturezas e não dependerem de premissas específicas das funções envolvidas. Isso faz com que esses algoritmos possam trabalhar em praticamente qualquer tipo de problema, mesmo sem existência de muito conhecimento *a priori* sobre o caso tratado. Além disso, os algoritmos evolutivos são considerados uma abordagem muito atrativa na busca de soluções para problemas com elevado grau de complexidade, nos quais a maioria dos métodos exatos se mostram ineficientes. Por fim, os AE são geralmente simples e não requerem muitos truques de implementação.

As características supracitadas motivaram a escolha de um algoritmo evolucionário, um algoritmo genético (AG), para a solução do problema de planejamento de redes WLANs. Desta forma, esse capítulo descreve a aplicação dos AG, seus operadores, estratégias empregadas nas operações genéticas e uma revisão sobre conceitos básicos de otimização multiobjetivo.

## 3.1 Algoritmos Genéticos

Os algoritmos genéticos são algoritmos de busca estocásticos baseados no princípio da evolução das espécies apresentado por Darwin, no qual uma população de indivíduos evolui através de

processos de seleção natural e genética [28]. Partindo dessa ideia, os AG se apóiam no conceito de hereditariedade, onde os indivíduos possuidores de melhores características em uma população têm maiores chances de sobrevivência e reprodução (seleção natural). Essa seleção natural por sua vez faz com que os descendentes gerados sejam cada vez mais aptos, melhorando assim a população como um todo.

Assim como na natureza, cada indivíduo contém um código genético que, quando decodificado, representa um possível arranjo das variáveis de decisão no problema a ser tratado pelo AG. A aplicação da representação cromossomial (ou alfabeto do AG) está relacionada ao tipo de problema e quais parâmetros devem ser mapeados. As representações mais empregadas são a binária, a inteira e a real. Basicamente, essas representações diferem nos métodos que são utilizados para traduzir os dados manipulados pelo algoritmo em um conjunto de valores que seja compreensível como variáveis do problema em questão.

Os AG podem ser definidos como algoritmos de busca populacionais, onde é possível explorar simultaneamente diferentes áreas do espaço de soluções. A população do algoritmo genético é composta por indivíduos (ou cromossomos), que são as possíveis soluções do problema de otimização. O tamanho da população tem papel determinante no desempenho do AG. Por um lado, uma população pequena tende a reduzir o desempenho do algoritmo genético, já que esta irá cobrir o espaço de busca de maneira limitada. Por outro lado, uma população grande irá fornecer uma cobertura mais representativa do domínio do problema, porém aumentando a demanda por recursos computacionais. Vale ainda ressaltar que populações muito grandes geralmente apresentam problemas de convergência, uma vez que estas causam uma inércia muito grande para o processo de evolução do algoritmo [37].

O desenvolvimento de um AG parte da criação de uma população inicial de indivíduos, que pode ser gerada de forma aleatória ou estruturada. Uma população gerada aleatoriamente assegura a existência de alguma diversidade nas soluções. Em problemas de otimização restritos, esta aleatoriedade dificulta a obtenção de soluções factíveis, o que geralmente motiva o emprego de outras técnicas. Quando o problema a ser tratado é previamente conhecido, é possível empregar heurísticas na inicialização da população. A população gerada por meio dessas heurísticas (geração estruturada) tende a eliminar a criação de soluções infactíveis. Porém, esse tipo de procedimento geralmente limita a diversidade e generalidade do conjunto inicial, que pode levar a convergência prematura do algoritmo.

No AG, a qualidade de cada solução é definida por sua aptidão (comumente referida como *fitness*) que, baseada na função objetivo, estima o quão bem cada indivíduo é capaz de resolver o problema de interesse [58]. Com isso, uma probabilidade de reprodução é associada a cada indivíduo, sendo essa probabilidade proporcional à aptidão.

A execução do algoritmo genético é dividida em gerações. A cada geração cria-se uma população temporária, normalmente com mesmo tamanho da população inicial por meio de um processo chamado seleção (vide seção 3.1.1). A seleção escolhe os indivíduos que irão compor a população temporária com base nas probabilidades de reprodução. Após a seleção, os indivíduos da população temporária são submetidos a operadores de cruzamento e mutação. Ao fim desse processo é gerada uma nova população que é o resultado final da geração atual. Essa nova população será utilizada como entrada para a próxima geração e o processo se repete, até que uma condição de parada seja satisfeita. Um esboço das operações realizadas em um AG é ilustrado pela Figura 5.

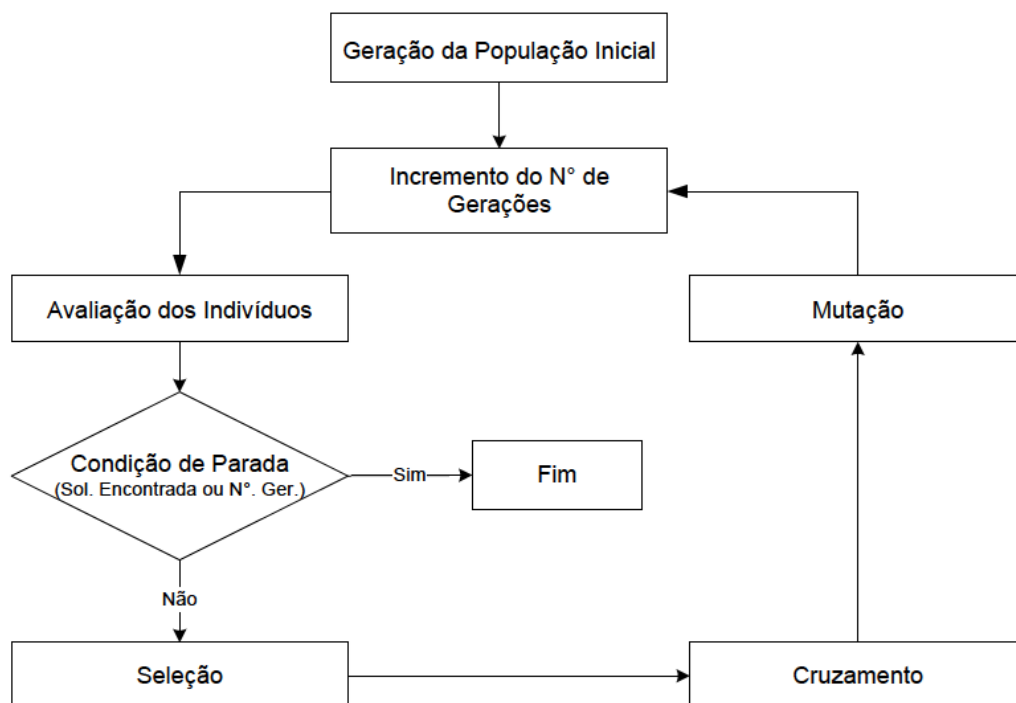


Figura 5 - Fluxograma de um AG

Os AG são reconhecidos por serem capazes de resolver problemas de otimização complexos em espaços de dimensões elevadas (grande número de variáveis de decisão envolvidas) [28]. Outra característica importante dos algoritmos genéticos é que, ao longo do processo de evolução, esses algoritmos dependem apenas do valor de função objetivo das soluções encontradas, não sendo

necessário, portanto, o cálculo de gradientes ou hessianas [37]. Isso faz desses métodos robustos e os torna aptos a lidar, idealmente, com qualquer tipo de problema de otimização.

### 3.1.1 Operadores Genéticos

Nos algoritmos genéticos, as populações de indivíduos criadas são submetidas aos operadores genéticos de seleção, cruzamento e mutação. Essa sequência de operações simula o processo de evolução natural dos indivíduos, permitindo assim que a população se torne, na média, cada vez mais apta ao longo das gerações.

Conforme já foi dito ao longo desse texto, é na etapa de seleção que são selecionados os indivíduos que darão origem a novas soluções por meio de cruzamento e mutação (indivíduos pais). A escolha dos pais tem papel fundamental na melhoria da qualidade das soluções ao longo do tempo e, conseqüentemente, na convergência do algoritmo. O fato da seleção dos AG ser probabilística faz com que os indivíduos com maior aptidão sejam privilegiados, mas ainda dá aos indivíduos menos aptos chance de permanecer na população e se reproduzir. Essa característica é essencial para evitar que o algoritmo fique preso em ótimos locais (convergência prematura) e permite uma busca mais ampla no espaço de soluções. Além disso, indivíduos com baixa aptidão podem ter características genéticas que sejam favoráveis à criação de bons indivíduos, características que eventualmente podem não estar contidas nos melhores indivíduos da população [37].

Existem diferentes métodos empregados para seleção dos indivíduos, sendo que os mais encontrados na literatura são: Roleta, Torneio, Ranking, Amostragem Determinística, *Stochastic Universal Sampling* (SUS) e *Stochastic Remainder Sampling* (SRS). Todos esses métodos são descritos por Goldberg em [28]. O mecanismo utilizado pelo algoritmo proposto neste trabalho não se enquadra em nenhum dos citados acima, uma vez que se trata de um problema multiobjetivo. O esquema de seleção que foi adotado aqui é descrito na seção 6.3.

Em geral, os AG utilizam dois operadores baseados em mecanismos genéticos para explorar o espaço de busca: cruzamento (ou recombinação) e mutação. O cruzamento combina pais selecionados, permutando informações genéticas destes para a produção dos filhos. De modo geral o cruzamento é realizado com base em dois ou mais pontos, que são selecionados de forma aleatória. Para cada conjunto de pais existe uma probabilidade de cruzamento  $P_c$  que pode variar entre 0 e 100%. No entanto, a maior parte dos estudos práticos aponta para valores de  $P_c$  entre 70% e 90%.

Os algoritmos genéticos são caracterizados pela alta flexibilidade de implementação, e esta característica se estende ao operador de cruzamento, que pode ser escolhido ou implementado conforme a aplicação em questão. Nas implementações clássicas, a recombinação geralmente é feita por um dos seguintes operadores: cruzamento de um ponto de corte, cruzamento de dois pontos de corte e cruzamento uniforme. No entanto, podem ser encontradas na literatura formas alternativas de se realizar esta operação, formas essas que adéquam-se melhor ao problema tratado. Para o caso específico de problemas com variáveis contínuas podem se citar o Cruzamento Binário Simulado ou SBX (do inglês *Simulated Binary Crossover*) [13], o cruzamento BLX (*Blend Crossover*) [19], recombinação aritmética [46] dentre outros. O operador SBX é descrito em detalhes na seção 6.4, uma vez que este é o operador empregado no algoritmo aqui proposto.

A mutação é o operador responsável por introduzir novas características genéticas na população e, eventualmente, restaurar material genético perdido ao longo do processo de evolução [37]. Dessa forma, a mutação cria diversidade em alguns indivíduos da população, mudando aleatoriamente alguns genes desses indivíduos. Isto quer dizer que podem ser geradas soluções-candidatas que possuem características que não estavam presentes em nenhum dos indivíduos da população corrente.

A probabilidade de mutação ( $P_m$ ) controla a intensidade com que o operador de mutação será aplicado nos indivíduos. De modo geral, esse valor deve ser baixo, para evitar que o operador transforme o algoritmo em uma busca aleatória. No entanto, deve-se ter em conta que uma taxa de mutação excessivamente baixa reduz a capacidade de exploração do AG, o que sugere a necessidade de se buscar um compromisso favorável.

Assim como nos outros operadores, também existem diferentes maneiras de se realizar a mutação dos indivíduos, e a escolha pelo operador mais adequado depende do problema tratado e do tipo de codificação empregada no AG. O tipo de mutação utilizado neste trabalho é a mutação polinomial, descrita na seção 6.5.

Vários tipos de critérios de parada podem ser utilizados em algoritmos genéticos. O critério mais comum é a realização de um número máximo de gerações (ou número máximo de avaliações de função). Nesses casos, o AG irá oferecer como resposta o melhor indivíduo, ou conjunto, obtido até o atendimento do critério de parada. Este foi o critério de parada adotado no presente trabalho.

## 3.2 Otimização de Problemas Multiobjetivo

Uma questão crucial no problema de planejamento de redes WLAN é como avaliar a qualidade de uma solução. Diversos critérios como cobertura, custo da solução e balanceamento da rede devem ser levados em conta no processo de avaliação. Este problema é, portanto, um problema de otimização multiobjetivo (PMO), uma vez que consiste em minimizar (ou maximizar) um conjunto de objetivos simultaneamente. Um exemplo de formulação para esta classe de problemas é apresentada a seguir:

$$X^* = \underset{x}{\operatorname{arg\,min}} [f_1(x) \dots f_m(x)] \quad (3.2)$$

*sujeito a:*  $x \in F_x \subset X$

em que  $x \in X$  é o vetor de decisão,  $X$  é o espaço das variáveis de decisão,  $F_x$  é o conjunto viável,  $[f_1(x) \dots f_m(x)]'$  é o vetor de funções objetivo e  $X^*$  é o conjunto de pontos eficientes.

Em problemas multiobjetivo geralmente não existe uma única solução que seja ótima para todos os critérios simultaneamente. Por isso, o objeto solução desse problema não é uma única solução, mas sim um conjunto de soluções em que não é possível estabelecer uma ordenação sem introduzir algum grau de subjetividade. Este objeto é definido a seguir.

O conjunto de pontos eficientes (ou conjunto Pareto-ótimo), que constitui a solução de um PMO, é composto de todos os vetores de decisão, na qual o vetor objetivo correspondente não pode ser melhorado em nenhuma dimensão, sem degradação de outra. O ponto  $\tilde{x} \in F_x$  é dito dominado por um outro ponto  $\bar{x} \in F_x$ , se a seguinte relação é atendida:

$$f(\bar{x}) \leq f(\tilde{x}) \quad \text{and} \quad f(\bar{x}) \neq f(\tilde{x}) \quad (3.3)$$

em que os operadores dos vetores acima,  $\leq$  e  $\neq$  são definidos como:

$$\begin{aligned} f(a) \leq f(b) &\leftrightarrow f_i(a) \leq f_i(b) \quad \forall i = 1, \dots, m \\ f(a) \neq f(b) &\leftrightarrow \exists i \in \{1, \dots, m\} : f_i(a) \neq f_i(b) \end{aligned} \quad (3.4)$$

O conjunto-Pareto  $X^*$  é definido como o conjunto de soluções não dominadas, como segue:



$$X^* \triangleq \{x^* \in F_x : \nexists z \in F_x \mid f(z) \leq f(x^*) \wedge f(z) \neq f_i(x^*)\} \quad (3.5)$$

Todos os vetores de decisão que não são dominados por nenhum outro vetor de decisão de um dado conjunto são chamados de não-dominados. Conseqüentemente, uma solução Pareto-ótima é um vetor  $x$  que não é dominado por nenhum outro vetor pertencente ao conjunto viável  $F_x$ , e o conjunto de todas as soluções Pareto-ótimas é o conjunto Pareto-ótimo  $X^*$ . A imagem do conjunto Pareto-ótimo no espaço das funções objetivo é geralmente chamado de fronteira Pareto. O conceito de fronteira Pareto é ilustrado na Figura 6.

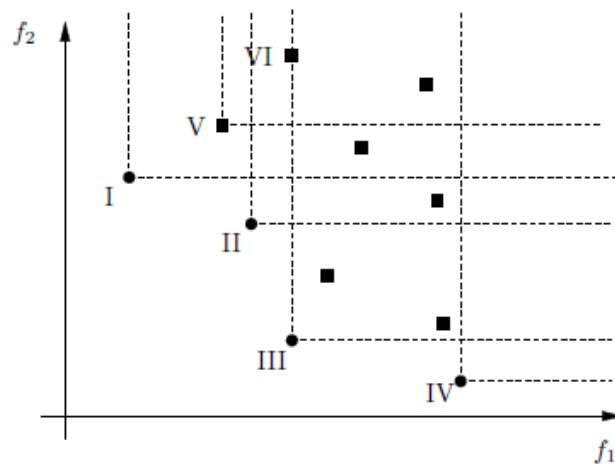


Figura 6 - Fronteira Pareto

Considere um problema de minimização bi-objetivo e assumamos que todas as soluções são avaliadas em relação às funções  $f_1(\cdot)$  e  $f_2(\cdot)$ , como mostrado na Figura 6. Os pontos marcados com círculo (I a IV) compõem as soluções eficientes, e os pontos marcados com o quadrado são as soluções dominadas. Note, por exemplo, que as soluções I e II dominam a solução VI, uma vez que elas são melhores do que a VI em ambas as funções objetivo simultaneamente. Além disso, a solução III também domina a VI, uma vez que ela é melhor que a VI em  $f_2$  sem ser pior em  $f_1$  (valores iguais). Embora a solução V domine a VI, ela não é uma solução eficiente, uma vez que esta é dominada pela solução I. Também deve ser observado que, apesar de a solução IV não dominar nenhuma outra solução, ela é uma solução Pareto-ótima, uma vez que não é dominada por nenhuma outra solução. Neste exemplo, as soluções I, II, III e IV compõem a fronteira Pareto do problema.

A mudança na escolha entre as soluções da fronteira Pareto sempre implica em ganho em um ou mais objetivos com respectiva perda em outros. Isso pode ser visto no exemplo apresentado na

Figura 7, adaptado de [12]. Neste caso deseja-se minimizar o custo e maximizar o conforto de um veículo a ser comprado. Por um lado, se somente o custo é levado em conta, o nível de conforto será bastante reduzido (carro 1), o que não irá agradar determinados públicos-alvo. Por outro lado, a simples consideração do conforto na tomada da decisão pode levar a automóveis muito caros (carro 2), fora do poder aquisitivo de muitos dos potenciais clientes. Com esse exemplo, pode-se notar que o ganho em um objetivo sempre acarreta em sacrifício no outro.

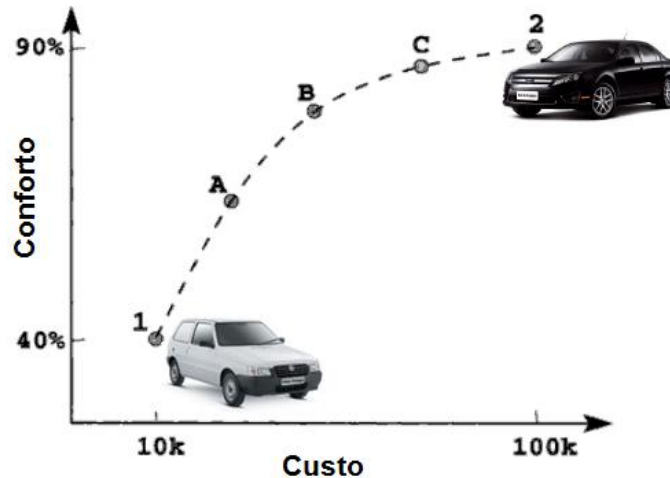


Figura 7 - Soluções hipotéticas do problema de decisão na compra de um carro

### 3.3 Algoritmos Evolucionários Multiobjetivo

Os Algoritmos Evolucionários Multiobjetivo ou MOEA (do inglês *Multiobjective Evolutionary Algorithm*) têm sido largamente explorados em PMO. O fato dos AG trabalharem com uma população de soluções contendo informações de diferentes regiões do espaço de busca torna esta estratégia interessante para ser aplicada em uma gama de problemas do mundo real. Como os problemas multiobjetivo possuem um conjunto de soluções igualmente ótimas, os MOEA oferecem maiores possibilidades para encontrar esse conjunto Pareto-ótimo ou uma aproximação do mesmo [4].

#### 3.3.1 Objetivo

O principal objetivo dos algoritmos evolucionários em problemas multiobjetivo é encontrar soluções que aproximem da melhor forma possível o conjunto de Pareto do problema em questão. Além disso, também se faz necessário buscar a diversidade nesse conjunto, uma vez que várias

soluções concentradas em pequenas regiões da fronteira Pareto não oferecem alternativas razoáveis ao projetista. A manutenção de um conjunto de soluções realmente distinto e disperso permite ao decisor analisar efetivamente o compromisso entre as soluções e escolher a mais adequada.

Na Figura 8a (adaptada de [49]) é exibida uma fronteira Pareto com boa distribuição das soluções. Por outro lado, a Figura 8b ilustra um conjunto onde as soluções estão distribuídas apenas em algumas regiões.

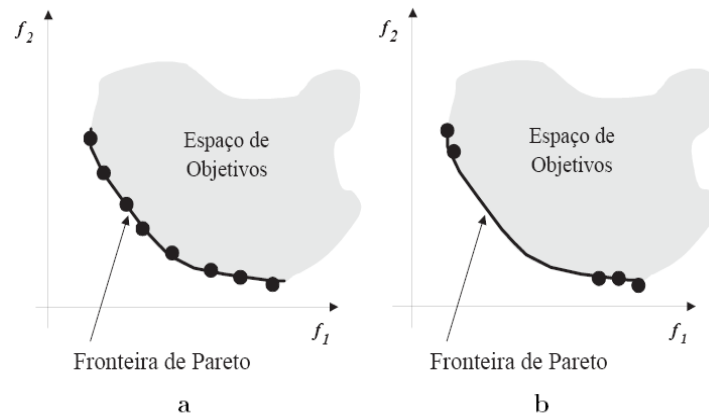


Figura 8 - Distribuição das soluções na fronteira de Pareto

### 3.3.2 Histórico dos MOEA

Goldberg [28] atesta que a primeira implementação prática para tratamento de problemas multiobjetivo teve início em 1984, quando Schaffer propôs o VEGA (*Vector Evaluated Genetic Algorithm*) [55]. Esse algoritmo emprega um operador genético de seleção, que cria populações separadas para cada objetivo, aglutina essas populações em uma só, embaralhando os indivíduos, e aplica os operadores de cruzamento e mutação. No entanto, esta abordagem polariza a busca por soluções, privilegiando os indivíduos que atendem com eficiência apenas um dos objetivos. Assim, este método não permite obter uma diversidade adequada nas soluções ao longo da fronteira de Pareto, além de não empregar nenhuma estratégia elitista.

Fonseca e Fleming apresentaram o MOGA (*Multiobjective Genetic Algorithm*) em 1993 [20]. Este algoritmo foi o primeiro a utilizar o conceito de soluções não dominadas e, simultaneamente, manter a diversidade dessas soluções. Esse algoritmo tem como base um esquema de classificação no qual a aptidão de cada indivíduo corresponde ao número de indivíduos da população que domina essa solução. Para distribuir a população ao longo da região de Pareto, este algoritmo adota uma técnica de nicho.

Proposto Horn et al. [31], o NPGA (*Niched-Pareto genetic algorithm*) se difere dos métodos anteriormente descritos por empregar uma seleção por torneio, baseada no conceito de dominância de Pareto e por não calcular um valor de aptidão. No NPGA, dois indivíduos escolhidos aleatoriamente são comparados com uma parte da população (geralmente 10% da população). Se um dos indivíduos dominarem o subconjunto e o outro não, o indivíduo não-dominado é o campeão do torneio. Se houver empate entre os dois indivíduos (ambos forem dominados ou não-dominados), utiliza-se um contador de nicho para escolher a solução vencedora. A vantagem do NPGA, além de haver necessidade de utilizar cálculos para a função de aptidão, está no fato de sua complexidade não ser proporcional ao número de objetivos.

Para lidar com as deficiências do VEGA, Goldberg [28] sugeriu um método de ordenação por não-dominância. Esse método foi empregado em um AGMO em 1994, quando Srinivas e Deb propuseram o NSGA (*Nondominated Sorting Genetic Algorithm*) [59]. O NSGA é similar ao MOGA, mas difere na forma com que ele classifica as soluções. No NSGA, as soluções são subdivididas em classes, de acordo com seu grau de dominância, e todas as soluções de uma mesma classe recebem a mesma aptidão. Para manter a diversidade da população, o algoritmo aplica o operador de seleção por ordenamento, junto com um mecanismo para a criação de nichos.

Em 1998, o SPEA (*Strength Pareto Evolutionary Algorithm*) foi proposto por Zitzler e Thiele [68], com o intuito de introduzir elitismo nos AE multiobjetivo. Nesse algoritmo, a relação de dominância é utilizada para avaliar e selecionar os indivíduos. Assim, as soluções não dominadas de cada geração (chamadas de elite) são armazenadas em uma população externa. O SPEA utiliza as soluções não dominadas da geração anterior para determinar a aptidão dos indivíduos da população corrente. Então, o algoritmo une a população de elite da geração atual com a da geração anterior, de modo que os melhores indivíduos sejam preservados. À medida que o algoritmo converge, em alguns casos, o número de soluções contidas no conjunto de elite deve ser controlado, para que seu tamanho não exceda a dimensão máxima desse conjunto.

Em 2001, foi proposto o SPEA-II (*Strength Pareto Evolutionary Algorithm II*), com o objetivo de tratar as limitações existentes no algoritmo anterior com o intuito de aprimorar sua eficiência [69]. Dentre as principais diferenças do SPEA-II em relação ao método antecessor pode-se destacar a diversidade da aptidão dos indivíduos e a densidade da população. Para se definir a aptidão de um dado indivíduo, o SPEA-II leva em consideração o número de soluções que dominam um indivíduo e também a quantidade de soluções dominadas pelo mesmo. O SPEA-II também utiliza uma técnica de

estimativa de densidade de vizinhança para a definição da aptidão do indivíduo visando maior diversidade no espaço de busca. Além disso, para preservar soluções extremas, o SPEA-II substituiu o método de *clustering*, utilizado no SPEA por um método de truncamento.

O PAES (*Pareto Archived Evolution Strategy*), proposto por Knowles e Corne [33], é considerado um dos MOEA mais simples dentre os mais modernos. O desempenho desse algoritmo pode ser comparado ao de algoritmos mais complexos, graças ao uso de uma estratégia de evolução que registra as soluções não-dominadas em um arquivo externo. Esse algoritmo utiliza um *grid* adaptativo para manter a diversidade das soluções presente na fronteira Pareto.

Em [11], Coello faz uma análise dos MOEA já criados e os classifica em duas gerações:

- os AE multiobjetivo da 1ª geração, na qual estão incluídos o VEGA, MOGA, NPGA e NSGA, que dão ênfase na simplicidade dos métodos implementados e não utilizam estratégias elitistas para preservar as soluções eficientes.
- os MOEA da 2ª geração, o autor destaca o PAES, NSGA-II, SPEA, SPEA-II. A ênfase desses algoritmos está na eficiência para se encontrar múltiplas soluções ao longo da fronteira Pareto, sem perder o desempenho já obtido com os métodos anteriores. Esses algoritmos implementam alguma estratégia de elitismo, seja implícita no próprio algoritmo ou explícita, em um arquivo externo contendo as melhores soluções.

Dentre os algoritmos citados acima, o único que não foi discutido ao longo dessa seção foi o NSGA-II (*Nondominated Sorting Genetic Algorithm II*). Essa exclusão se deve ao fato deste ser o algoritmo utilizado nesse trabalho, e ser discutido de forma mais detalhada ao longo da próxima seção.

A escolha pelo NSGA-II se justifica pelo fato desse algoritmo ser um dos mais modernos e eficientes na obtenção de aproximações do conjunto de Pareto em problemas com poucos objetivos. Essa característica fez com que esse algoritmo seja largamente aplicado para a solução de problemas práticos.

### **3.3.3 *Nondominated Sorting Genetic Algorithm II (NSGA-II)***

Proposto por Deb et al. em [15], o NSGA-II é um algoritmo genético multiobjetivo, elitista, que implementa o conceito de dominância para classificar sua população e aplica um método para diversificar as soluções da fronteira Pareto. Esse algoritmo surgiu como um aperfeiçoamento de seu predecessor, o NSGA, que possuía problemas como alta complexidade computacional na classificação dos indivíduos, ausência de elitismo e a necessidade de parâmetros externos para o operador de nicho.

No NSGA-II é utilizado o *Fast Non-Dominated Sorting*, um procedimento eficiente para classificação dos indivíduos baseado em não-dominância. A estrutura do algoritmo, associada a esse mecanismo, torna o algoritmo naturalmente elitista e garante que a melhor aproximação do conjunto de Pareto encontrada até o momento não seja perdida. Além disso, foi proposto um operador de nicho que busca manter a diversidade da aproximação do conjunto de Pareto encontrado. Esse mecanismo, chamado distância de multidão (do inglês *crowding distance*) tem como principal vantagem a ausência de parâmetros externos a serem definidos pelo usuário. Por fim, o NSGA-II também define um operador denominado *crowded comparison* (ou comparação de multidão), que estende o torneio estocástico para considerar a distância de multidão além da aptidão. Esses operadores são descritos ao longo desse capítulo.

Vale ressaltar que não é necessário realizar nenhuma adaptação nos operadores de cruzamento e mutação, uma vez que esses não são afetados pelo número de objetivos de problema em questão.

Um pseudocódigo do algoritmo NSGA-II é apresentado na sequência.

---

---

#### *Pseudocódigo do algoritmo NSGA-II*

---

$P$ : População pai  
 $Q$ : População filha  
 $N$ : Tamanho fixo para  $P$  e  $Q$   
 $F_j$ : Conjunto de soluções na fronteira  $j$   
 $d$ : distância de multidão  
 $t$ : número da geração atual

- Passo 0: Gerar população inicial  $P_0$  com  $N$  indivíduos;
- Passo 1: Gerar população filha  $Q$  com  $N$  indivíduos, aplicando os operadores genéticos (seleção por torneio *crowding*, mutação e cruzamento);
- Passo 2: Combinar a população base  $P_t$  e a população filha  $Q_t$  em uma população  $R_t$  com tamanho  $2N$  indivíduos;
- Passo 3: Ordenar todos os indivíduos da população  $R_t$  em níveis de dominância  $F_j$ ;
- Passo 4: Preencher uma nova população  $P_{t+1}$  sequencialmente, com indivíduos classificados nos primeiros níveis de  $F_j$  até que  $|P_{t+1} + F_j| \leq N$ ;
- Passo 5: Calcular a distância de multidão  $d$  para cada indivíduo da fronteira  $F_{j+1}$ ;
- Passo 6: Ordenar  $F_{j+1}$  conforme distâncias  $d$ ;
- Passo 7: Copiar as primeiras  $N - |P_{t+1}|$  soluções de  $F_{j+1}$  para  $P_{t+1}$ ;
- Passo 8: Caso o critério de parada tenha sido atingido, finalizar. Senão, retornar ao Passo 1.
- 
-

O NSGA-II trabalha com uma população pai  $P_t$  de tamanho  $N$ , classificada em diferentes níveis de dominância. A cada solução é atribuído um valor de aptidão, igual ao seu nível de dominância (1 para a primeira fronteira, 2 para a seguinte e assim por diante). Os operadores de seleção (*crowded comparison*), cruzamento e mutação são aplicados sobre  $P_t$  para encontrar a população filha  $Q_t$ , também de tamanho  $N$ . Uma vez gerada a população filha, o algoritmo combina as duas populações, formando assim uma única população  $R_t = P_t \cup Q_t$  de tamanho  $2N$ . O *Fast Non-Dominated Sorting* é então aplicado sobre  $R_t$ , para formação de  $P_{t+1}$  e o processo se repete.

### 3.3.3.1 Fast Non-Dominated Sorting

Para selecionar a população  $P_{t+1}$  a partir de  $R_t$ , o NSGA-II utiliza o método de seleção *Fast Non-Dominated Sorting*. Esse processo analisa todos os indivíduos da população, realizando comparações uns com os outros para classificá-los de acordo com o seu grau de dominância. Assim, ao analisar um conjunto de soluções da população  $R$  com objetivos múltiplos, torna-se possível classificá-las em  $J$  diversas fronteiras ( $\mathcal{F}_1, \mathcal{F}_2, \dots, \mathcal{F}_J$ ), de modo que todas as soluções sejam inseridas em um dos  $J$  *fronts* existentes.

A fronteira 1 é sempre composta pelo conjunto das soluções eficientes em relação à população atual. A fronteira 2 pode ser obtida aplicando o critério de não-dominância na população, excluindo as soluções do *front* 1. O mesmo se repete para as fronteiras seguintes, até que todos os indivíduos tenham sido classificados. A representação das fronteiras pode ser visualizada na Figura 9, extraída de [49].

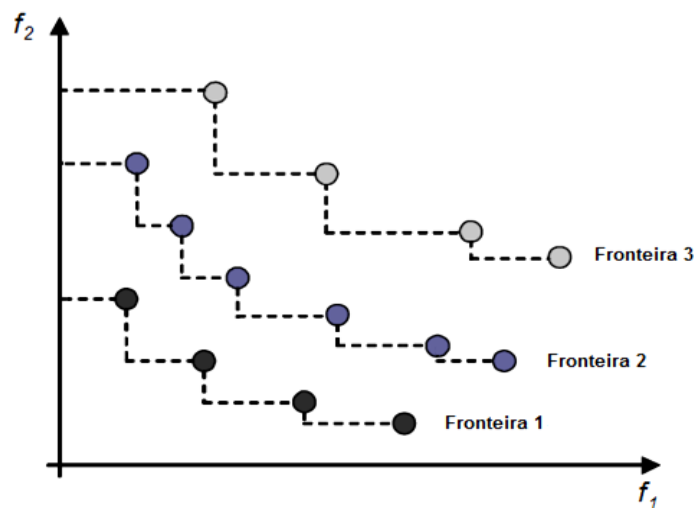


Figura 9 - Fronteiras geradas pelo cálculo de dominância

O Pseudocódigo do *Fast Non-Dominated Sorting* apresentado em [15] é exibido a seguir:

---

***Pseudocódigo de ordenação por não-dominância***

---

```

1  para cada solução  $i \in R$  faça
2       $nd_i = 0$ 
3       $U_i = \phi$ 
4      para cada solução  $j \neq i$  e  $j \in R$  faça
5          se  $i < j$  então
6               $U_i = U_i \cup \{j\}$ 
7          senão se  $j < i$  então
8               $nd_i = nd_i + 1$ 
9      se  $nd_i = 0$  então
10          $\mathcal{F}_1 = \mathcal{F}_1 \cup \{i\}$ 

```

} Etapa 1

```

11  $k = 1$ 
12 enquanto  $\mathcal{F}_k \neq \phi$  faça
13      $Temp = \phi$ 
14     para cada solução  $i \in \mathcal{F}_k$  faça
15         para cada solução  $j \in U_i$  faça
16              $nd_j = nd_j - 1$ 
17             se  $nd_j = 0$  então
18                  $Temp = Temp \cup \{j\}$ 
19      $k = k + 1$ 
20      $\mathcal{F}_k = Temp$ 

```

} Etapa 2

---

Para cada uma das soluções  $i$  contidas na população  $R$  são calculados os seguintes valores:

- $nd_i$ : número total de soluções que dominam a solução  $i$ .
- $U_i$ : conjunto de soluções dominadas pela solução  $i$ .

A ordenação de não dominância é executada em duas etapas. Na primeira etapa (linhas 1-10), todos os indivíduos da população  $R$  serão classificados de acordo com o grau de dominância  $nd_i$ . Assim, se uma solução  $i$  não é dominada por nenhum indivíduo, seu valor de  $nd_i$  será igual a 0. A etapa 2 (linhas 11-20) consiste em separar cada indivíduo em diferentes fronteiras, de acordo com seus valores de dominância indicados por  $nd_j$ . Desta forma, o contador  $n_j$ , de cada uma das soluções  $j$ , é decrementado e quando  $nd_j = 0$  significa que a solução não pertence à fronteira Pareto corrente.

Após cada geração  $t$ , as soluções  $R_t$  são classificadas por níveis de dominância, resultando nas fronteiras  $\mathcal{F}_1, \mathcal{F}_2, \dots$ . Essas fronteiras irão formar a nova população  $P_{t+1}$ . Para isto, as soluções presentes nas primeiras fronteiras são inseridas nessa nova população, até que seu tamanho se iguale a  $N$ . Com



isso, as  $N$  “piores” soluções são descartadas. Detalhes deste procedimento podem ser vistos na Figura 10, adaptada de [15]. No entanto é comum ocorrer uma situação em que, ao adicionar as soluções de uma fronteira  $F_j$  à população  $P_{t+1}$ , o número de soluções contidas na mesma, ultrapasse  $N$ . Assim, faz-se necessário um procedimento competitivo para escolher as soluções presentes na fronteira  $F_j$  que estejam mais bem espalhadas. Esse método será detalhado na próxima seção.

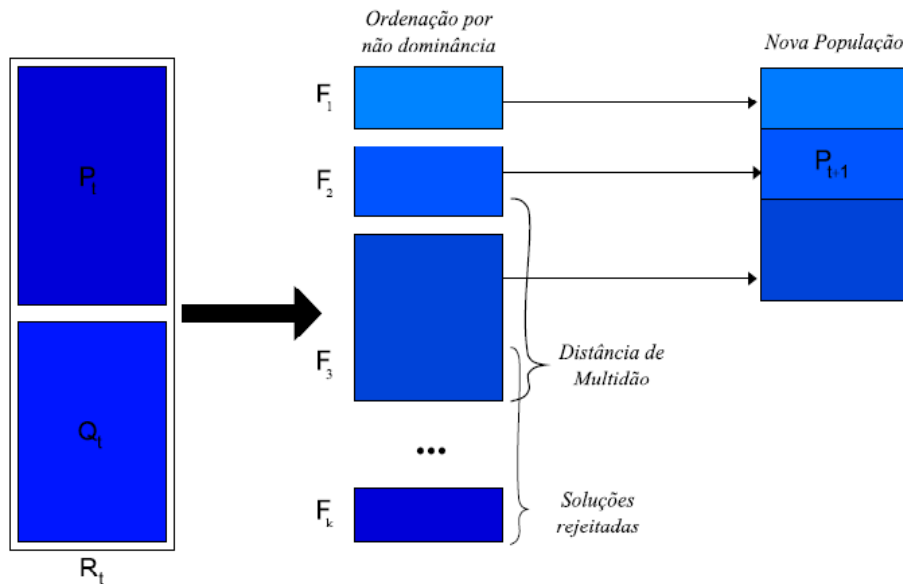


Figura 10 - Procedimento do NSGA-II

### 3.3.3.2 Crowding Distance

As soluções pertencentes à mesma fronteira possuem o mesmo nível de dominância, o que, inicialmente as torna indiferentes. Para classificar essas soluções e garantir um melhor espalhamento destas ao longo da aproximação da fronteira Pareto, torna-se necessário a utilização de um operador de nicho no NSGA-II. Assim, um procedimento denominado Distância de Multidão (do inglês *Crowding Distance*) para essa tarefa.

A métrica utilizada pelo *Crowding Distance* para garantir a diversidade das soluções dominantes contidas na fronteira Pareto é a distância de cada indivíduo para seus vizinhos mais próximos. Assim, a distância de multidão de uma solução  $i$ , definida por  $d_i$ , pode ser obtida estimando o perímetro formado por um cubóide, cujos vértices são os vizinhos mais próximos da solução  $i$ . Neste caso, quanto maior o cubóide, mais distante essa solução encontra-se das soluções vizinhas. A Figura 11, retirada de

[49], demonstra o conceito do cálculo da distância de multidão realizado pelo NSGA-II para dois objetivos.

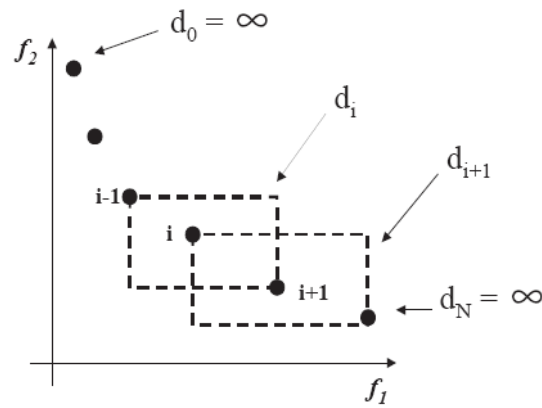


Figura 11 - Cálculo de distância de multidão

O objetivo do *Crowding Distance* é favorecer as soluções que estão mais distantes de suas soluções vizinhas. Assim, este método visa áreas da fronteira Pareto que são pouco exploradas, aumentando a probabilidade de criação de novos indivíduos nessas áreas. Outra observação importante é que os cubóides dos pontos extremos (solução  $0$  e solução  $N$  da Figura 11) da fronteira Pareto possuem valor infinito, o que garante a preservação dos extremos.

### 3.3.3.3 Crowded Comparison

O método de seleção empregado no NSGA-II é baseado no torneio estocástico clássico. No entanto esse operador é adaptado de forma a incorporar a *Crowding Distance* na seleção. Esta forma de seleção foi chamada de *crowded comparison operator*, e funciona da seguinte forma:

Dadas duas soluções  $i$  e  $j$ ,  $i$  será vencedor se:

1. a solução  $i$  possui um melhor aptidão (melhor fronteira);
2. se as duas soluções estiverem na mesma fronteira,  $i$  é considerada melhor que  $j$  caso possua uma distância de multidão maior.

## 4 Caracterização do Problema

Para qualquer rede sem fio de médio e grande porte, um planejamento pode ser útil para evitar gastos desnecessários com a aquisição/instalação de equipamentos e aumentar a performance da rede. Porém, desenvolver um projeto coerente e que atenda às necessidades dos usuários é uma tarefa difícil, que envolve questões conflitantes. Assim, as WLAN devem ser projetadas levando em consideração não somente aspectos como a área de cobertura, mas também a quantidade de pontos de acesso, a demanda dos usuários e a interferência co-canal causada por outros equipamentos na rede. Cada um destes aspectos é discutido de forma sucinta ao longo desse capítulo.

### 4.1 Cobertura e Localização de Pontos de Acesso

No planejamento de uma *Wireless LAN*, uma exigência fundamental para a rede é fornecer cobertura de sinal adequada para uma determinada área de serviço. Essa área de serviço corresponde à região coberta pelos pontos de acesso da rede e sua dimensão está relacionada ao raio de alcance dos AP. O cálculo da área de cobertura de uma rede 802.11 pode ser realizado verificando se, para cada um dos pontos de demanda da rede, existe pelo menos um AP que o cobre [64]. No caso da Figura 12, é possível perceber que a área de cobertura fornecida pelos pontos de acesso da rede não atende às necessidades do ambiente, uma vez que existem vários pontos de demanda descobertos.

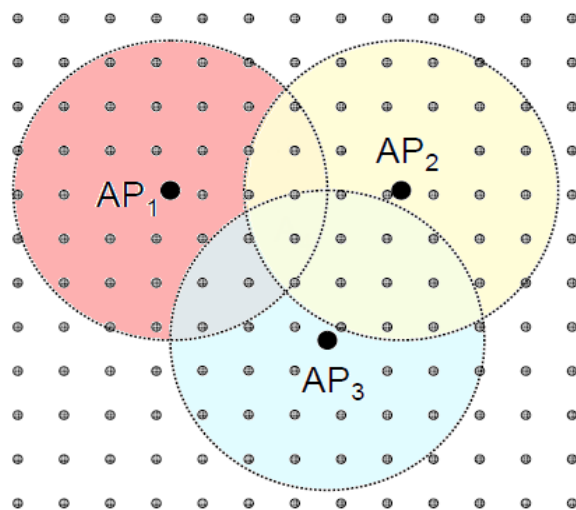


Figura 12 - Área de cobertura de uma WLAN

Desta forma, o problema de cobertura e localização de AP em redes WLAN pode ser tratado como um Problema de Cobertura de Conjuntos (PCC). O PCC consiste em encontrar o menor número de pontos de um conjunto de facilidades necessário para cobrir um conjunto de pontos de demanda. Cada ponto do conjunto de demanda deve estar localizado a uma distância máxima de um ponto no conjunto de facilidades.

Considere o exemplo aplicado às redes WLAN, na qual o conjunto de facilidades são representados pelos pontos de acesso  $AP_m = \{A \dots Q\}$  e os nós clientes  $NC_n = \{a \dots z\}$  da rede representam o conjunto de pontos de demanda. Suponhamos que cada ponto de demanda deva estar localizado a uma distância inferior a 85 metros de um dos pontos de acesso. A matriz de distâncias mínimas entre os AP da rede é dada a seguir:

$$[dist(i,j)] = \begin{matrix} & a & b & c & d & e & f & \dots & z \\ \begin{matrix} A \\ B \\ C \\ D \\ \vdots \\ Q \end{matrix} & \left[ \begin{array}{cccccccc} 23 & 40 & 120 & 48 & 160 & 62 & \dots & 56 \\ 145 & 78 & 31 & 250 & 14 & 25 & \dots & 97 \\ 34 & 211 & 56 & 70 & 89 & 67 & \dots & 44 \\ 103 & 49 & 7 & 95 & 28 & 116 & \dots & 39 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 78 & 112 & 46 & 78 & 88 & 109 & \dots & 5 \end{array} \right. \end{matrix}$$

A matriz  $[dist(i,j)]$  pode ser convertida em uma matriz binária de cobertura  $[cobert(i,j)]$ , fazendo:

$$cobert(i,j) = \begin{cases} 1, & \text{se } dist(i,j) \leq 85 \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

$$[cobert(i,j)] = \begin{matrix} & a & b & c & d & e & f & \dots & z \\ \begin{matrix} A \\ B \\ C \\ D \\ \vdots \\ Q \end{matrix} & \left[ \begin{array}{cccccccc} 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & \dots & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & \dots & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & \dots & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & \dots & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & \dots & 1 \end{array} \right. \end{matrix}$$

A matriz “cobert” é denominada matriz de incidência. Cada linha desta matriz representa os pontos de demanda cobertos por um determinado ponto de acesso, ou seja, caso o  $AP_i$  cubra o ponto de demanda  $NC_j$ , tem-se  $cobert(i, j) = 1$ , caso contrário,  $cobert(i, j) = 0$ . Então, o problema de cobertura e localização de APs em redes WLAN consiste em encontrar o menor número de pontos de acesso necessários para cobrir um conjunto de pontos de demanda, podendo ou não considerar obstáculos.

Nas redes 802.11, um usuário pode ser coberto por um AP caso a intensidade de sinal recebida (RSSI) no cliente for suficientemente maior que o limite de sensibilidade de recepção especificado para sua placa *wireless*. Utilizando modelos de propagação das ondas eletromagnéticas descritos no próximo capítulo é possível estimar uma distância na qual a RSSI seja adequada, de modo que essa distância possa ser utilizada em uma matriz de cobertura. A proposta de se trabalhar com distâncias ao invés de cálculos da intensidade de sinal presente nos pontos de demanda ao longo das gerações do AG facilitou a avaliação da cobertura para cada uma dos arranjos de posicionamento dose AP nas redes WLAN. Assim, o objetivo dessa abordagem é trazer ganhos em termos de custo computacional para algoritmo genético implementado.

A quantidade e posicionamento dos dispositivos concentradores é um ponto chave no planejamento e desenvolvimento de uma rede WLAN infra-estruturada. Fatores como custo, desempenho, qualidade de serviço e alcance da rede estão diretamente ligados a estes dois aspectos. Contrariamente, a alocação do AP é, na maior parte dos casos, feita de maneira *ad hoc*, baseada apenas na experiência de um projetista [2]. Esta abordagem de tentativa e erro é muito demorada, cara e muitas vezes imprecisa. Se uma quantidade insuficiente de pontos de acesso é disponibilizada no ambiente ou se o posicionamento destes é inadequado, poderão surgir áreas de sombra (regiões onde não há cobertura de sinal) durante a operação da rede sem fio.

Para contornar esse problema, os projetistas de rede tendem a saturar o ambiente com muitos pontos de acesso, especialmente durante os estágios iniciais do projeto de rede [27]. No entanto, as unidades extras dos AP podem aumentar os custos da rede e dificultar a atribuição de seus canais sem interferência.

Assim, para tratar o problema de localização de pontos de acesso, é necessário estabelecer, dentro de um conjunto de possíveis locais para instalação dos APs, um subconjunto que: apresente o menor custo, a melhor cobertura, atenda as diferentes demandas de usuários e explore de maneira eficiente o conjunto de canais disponíveis. Nesse processo, é necessário considerar algumas características inerentes às redes WLAN: padrão adotado, fabricantes e modelos dos equipamentos,

número de clientes, custo, raio de cobertura, tipo e ganho das antenas, etc.

## 4.2 Balanceamento de Carga

Estudos indicam que os usuários de uma WLAN tendem a se agrupar em certos locais de rede por várias razões, como disponibilidade de redes sem fio com boa intensidade de sinal, proximidade de locais de alimentação (Shopping Centers, cafés), além de AP disponíveis em *hotspots*, criando áreas altamente congestionadas [5]. A tendência da maioria das tecnologias *wireless* é oferecer cada vez mais mobilidade aos usuários de uma rede sem fio. No entanto, alguns pesquisadores [5],[6] observaram que os usuários de uma WLAN são, em muitas vezes, estacionários, permanecendo conectados à rede no mesmo lugar durante longos períodos. Com isso, vários clientes podem associar-se ao mesmo AP, o que reduz drasticamente o *throughput* geral da rede. Esta situação pode ser visualizada na Figura 13.

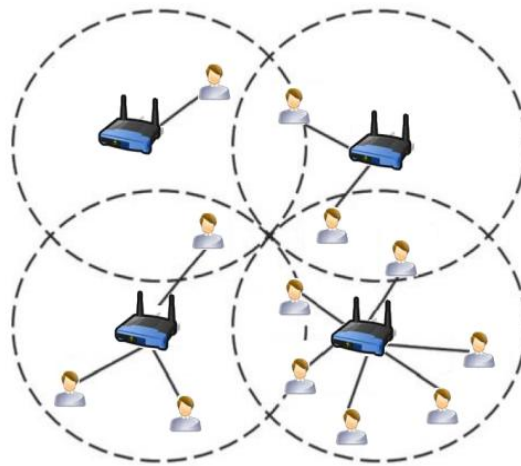


Figura 13 - Rede WLAN desbalanceada

Em sua implementação tradicional, restrita apenas à sugestão do padrão IEEE 802.11f, os clientes de uma WLAN utilizam somente a intensidade do sinal recebido como critério para escolher em qual AP devem associar-se. Isso quer dizer que, apesar de um *hotspot* ser coberto por vários pontos de acesso, a maioria dos usuários estará conectada a poucos AP, que irão lhes fornecer o sinal mais forte. Como o padrão IEEE 802.11 não provê nenhum mecanismo para balanceamento de carga, isto irá resultar em baixa qualidade de serviço, tendo em vista a sobrecarga do AP [7],[35],[66].

Note que a capacidade de transmissão de dados de um ponto de acesso com uma estação cliente é limitada (54 Mbps para o padrão G, por exemplo). Esse limite fica ainda reduzido na medida em que

crece o número de usuários ativos na rede, devido ao aumento da taxa de colisões de pacotes. Esta situação tende a se agravar quando ocorrem aglomerações de clientes em determinadas áreas da rede sem fio.

Conforme abordado na seção 2.2.2, as demandas dos usuários por serviços têm uma natureza absolutamente dinâmica. Assim, ao passo em que o uso de uma rede WLAN estende-se além de um simples acesso a páginas da Internet, a necessidade de considerar em um projeto, diferentes exigências de banda por parte dos usuários torna-se clara. Desta forma, fornecer a taxa de dados suficiente para diferentes aplicações e garantir que nenhum AP da rede esteja sobrecarregado são algumas das etapas necessárias para se garantir que uma WLAN ofereça a seus clientes boa qualidade de serviço.

Após essas considerações, entende-se que a implementação de mecanismos de balanceamento de carga vai melhorar a eficiência da rede e aumentar a capacidade de satisfazer os requisitos de QoS. Sabe-se que o balanceamento de carga em redes WLAN pode ser realizado através do controle da associação AP - cliente, o que já é feito em alguns equipamentos, por meio de soluções proprietárias.

### **4.3 Atribuição de Canais em Redes WLAN**

Os dispositivos em uma rede local sem fio lidam com o mesmo meio para transmissão dos dados. Quando operam em uma mesma frequência, somente uma estação pode ocupar o meio em um dado instante. Se múltiplas estações transmitem simultaneamente, uma colisão pode ocorrer e o sinal poderá se corromper, o que resulta em perda de desempenho na rede [24],[36],[38]. Para contornar este problema, duas técnicas são empregadas na transmissão dos dados. Uma delas é o uso do protocolo de controle de acesso ao meio CSMA/CA (vide seção 2.3) que coordena a transmissão dos clientes em uma rede local sem fio, para evitar as colisões. Outra possibilidade, mais simples, é transmitir os dados utilizando diferentes canais, para evitar colisões. No entanto, essa alternativa torna-se limitada nas WLAN mais populares (padrão IEEE 802.11g), uma vez que estas dispõem de apenas três canais (1, 6 e 11) não interferentes [24],[64]. Isto se deve ao fato dessas redes operarem em uma faixa de frequência não-licenciada, que possui severas restrições de largura de banda e canais disponíveis. Esta escassez de canais limita o número de redes que podem coexistir sem a geração de interferência mútua.

Conforme mencionado na seção 2.2.1, a interferência é uma das principais razões para que a plena capacidade de uma rede sem fio não seja utilizada. Desta forma, é importante empregar soluções

para a correta alocação de canais durante a fase de planejamento de uma WLAN para minimizar os prejuízos gerados pela interferência.

O problema de planejamento de canais em redes *Wireless* LAN envolve a atribuição de frequências a um dado conjunto de pontos de acesso, de modo que a intensidade do sinal recebido pelos clientes da rede seja maior que o sinal de interferência. Sabe-se, que em qualquer rede sem fio é desejável manter a relação de sinal para a interferência o mais alto possível. Então, o valor da SIR pode ser elevado de duas formas: aumentando a intensidade de sinal presente nas estações clientes ou reduzindo a interferência na rede. O aumento no nível de sinal recebido pelos clientes pode ser obtido se a potência de irradiação de sinal nos pontos de acesso também for elevada. Porém, existe um grande problema ao utilizar esta abordagem, pois, se vários AP realizarem este procedimento a interferência mútua gerada também será elevada. Sendo assim, uma forma viável para elevar a SIR nos clientes da WLAN consiste em reduzir ao máximo a interferência entre os pontos de acesso da rede, uma vez que nem sempre é possível eliminá-la. Para isso, diferentes técnicas vêm sendo empregadas para resolver o problema da atribuição de frequências nas redes sem fio. O que difere estes métodos são as restrições impostas ao modelo desenvolvido e as funções objetivo do problema.

Um método muito comum, empregado em redes de celulares, mas que também pode ser aplicado em redes locais sem fio, é o de respiração celular (do inglês *cell breathing*) [7],[66]. Esta técnica consiste em reduzir a área de cobertura de uma estação base ou BS (do inglês *Base Station*), diminuindo a potência de transmissão, de modo que as células formadas pelas BS causem a menor interferência possível nas células vizinhas. Este método é útil em ambientes com elevada concentração de usuários, na qual mais estações base são necessárias. No caso das WLANs, uma BS corresponde ao AP da rede e esta configuração de potência de irradiação do sinal pode ser facilmente modificada. No entanto, na maioria dos trabalhos encontrados na literatura [24],[36],[38],[47], o problema de alocação de canais é modelado e resolvido como um problema de coloração de grafos. Nessa modelagem, cada vértice do grafo representa um ponto de acesso da rede, cada cor representa um canal não sobreposto e a extremidade de cada borda do grafo representa o alcance dos AP. Neste caso, quando duas ou mais bordas do grafo se encontram, isso significa que parte da cobertura de um ponto de acesso está na área de cobertura do outro, podendo ocasionar interferência, caso esses AP estejam operando no mesmo canal (vértices coloridos com a mesma cor).

O objetivo do problema de coloração de grafos é atribuir sempre que possível, cores (canais) distintas para os vértices (AP) adjacentes do grafo. Apesar de esse problema ser de fácil compreensão,



sua resolução, no entanto, é difícil de ser obtida em instâncias elevadas por métodos exatos. Sendo assim, o problema de coloração de grafo é considerado um problema NP-difícil ,[38],[47],[52], já que não se conhecem métodos polinomiais capazes de obter sua solução de forma exata. Desta forma, métodos heurísticos são geralmente empregados para se obter soluções próximas da ótima nesse problema, em tempo razoável.

Quando se torna necessário alocar muitos AP em uma determinada área, é possível que o número de canais não sobrepostos existentes não seja suficiente para garantir não interferência entre AP. Nesse caso, a reutilização de canais se torna necessária e objetivo do problema passa a ser reduzir ao máximo as zonas de interferência nas áreas de interesse.

# 5 Modelo Proposto

## 5.1 Propagação das Ondas de Rádio

No espaço livre, as ondas de rádio propagam-se com a forma geométrica de uma esfera, e à medida que se afasta do transmissor, elas são propagadas em “esferas” cada vez maiores. Assim, é possível perceber que a perda no espaço livre se dá única e exclusivamente em razão da dispersão de energia ao longo do trajeto, pois a antena receptora capta apenas parte da energia irradiada pela antena transmissora [54].

A propagação *indoor* é um assunto importante a ser considerado no projeto de redes WLAN. Assim, na fase de planejamento das redes locais sem fio, o cálculo da RSSI é uma das principais tarefas para estimar a área de cobertura dos AP. Desta forma, o raio de cobertura de um ponto de acesso pode ser calculado por meio de modelos de perda de percurso. Nestes modelos, esta área de cobertura é calculada em função da distância entre um AP e um cliente, além do local onde o sinal é propagado, já que diferentes ambientes impõem problemas particulares para o planejamento de WLAN.

A propagação de ondas eletromagnéticas em ambientes fechados é um assunto complexo, sendo que existem vários modelos matemáticos que descrevem seu funcionamento. Nesta dissertação, a apresentação desses modelos será realizada de maneira simplificada, mas suficiente para atender os requisitos um projeto de WLAN *indoor* em um ambiente amplo sem barreiras.

### 5.1.1 Modelo *Log-distance*

Conforme mencionado, modelos de perda de percurso são usados para calcular a cobertura do sinal de estações base, ou ponto de acesso, no caso das redes locais sem fio. Neste sentido, os estudos de Rappaport [51] e Sanches [54] foram utilizados para estabelecer o modelo considerado nesta dissertação. Os autores descrevem o modelo *Log-distance*, que considera a perda de percurso em ambientes fechados sem barreiras, para uma WLAN plana. Esse modelo pode ser expresso da seguinte maneira (equação 5.6):

$$L(d) = L(d_0) + 10 \times n \times \log_{10} \left( \frac{d}{d_0} \right) + X_\delta \quad (5.6)$$

Onde:

$L$  = perda por propagação em função da distância, medido em dB;

$d$  = distância entre o ponto de acesso e a estação cliente em metros;

$L(d_0)$  = perda de propagação de referência a um metro de distância em dB. Nas redes 802.11 com frequência de 2,4 GHz, o valor de  $L(d_0)$  será de 40,2 dB;

$n$  = expoente da perda de percurso que especifica o comportamento da perda para um ambiente particular

$X_\delta$  = variável que representa a margem do desvanecimento, de acordo com o ambiente.

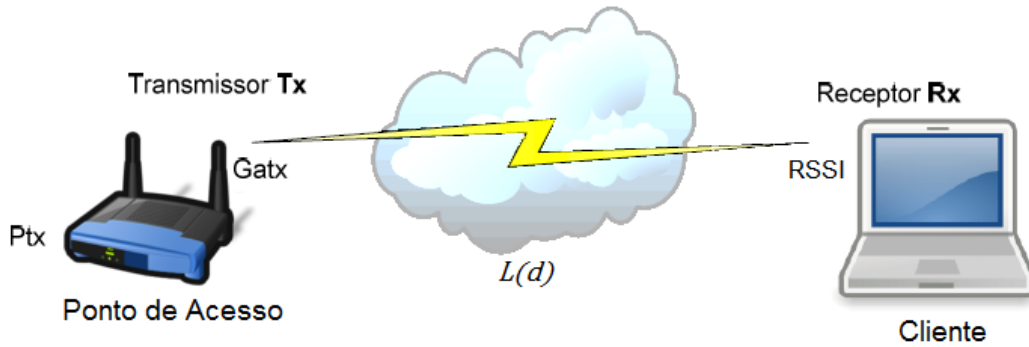
O desvanecimento pode ser descrito como uma variação instantânea na intensidade do sinal, relativo ao valor médio da potência recebida. Assim, ao planejar uma rede sem fios em ambientes fechados, deve-se considerar este fenômeno, de forma que o nível mínimo de recepção de sinal tenha uma margem contra o desvanecimento.

### 5.1.2 Nível de Recepção do Sinal (RSSI)

Para saber se uma comunicação entre AP e cliente é factível a uma determinada distância, é necessário calcular as atenuações provocadas pela propagação do sinal no espaço e verificar se o sinal recebido pelo cliente encontra-se dentro dos parâmetros de sensibilidade da antena receptora [54]. Desta forma, o sinal recebido em uma estação cliente pode ser estimado por meio de (5.7).

$$RSSI = Potência (tx)_{dBm} + ganho antena (tx)_{dBi} - L(d)_{dB} \quad (5.7)$$

Nestes modelos, a intensidade do sinal recebido é calculada adicionando a potência de irradiação do transmissor ao ganho da antena utilizada e subtraindo a perda de propagação a uma distância. O esquema das perdas e ganhos contidos na equação 5.7 pode ser ilustrado na Figura 14.



Ptx - Potência de transmissão  
 Gatx - Ganho da antena transmissora

$L(d)$  - perda por propagação em função da distância  
 RSSI(rx) - Nível de recepção de sinal no cliente

Figura 14 - Esquema de perdas e ganhos numa comunicação

## 5.2 Planejamento de Redes WLAN

### 5.2.1 Problema de Cobertura e Localização de AP

Baseado na abordagem proposta em [42], é possível determinar o número mínimo de pontos de acesso necessários para atender a uma cobertura pré-estabelecida. Com base nesse dado, foi definido que no máximo  $N$  pontos de acesso podem ser instalados, sendo  $N$  duas vezes o valor mínimo calculado. Esta definição se deve ao fato da quantidade mínima de AP não ser suficiente para garantir os outros requisitos da rede. Como haverá mais pontos de acesso disponíveis que o necessário para assegurar a cobertura mínima, o AG desenvolvido considerou o emprego de uma técnica de controle de redundância, por meio de um vetor de ativação. Essas definições serão abordadas com detalhes na seção 6.2. Deste modo, o problema de cobertura em WLAN pode ser formulado como segue:

Dado um conjunto de pontos de acesso  $N$ , um vetor de ativação  $v$  composto por  $N$  posições, um conjunto de nós clientes  $nc$  e um fator de cobertura desejado  $fcob$ , este problema consiste em minimizar o número de pontos de acesso ativos no vetor  $v$ , garantindo que pelo menos  $fcob$  % dos  $nc$  clientes sejam cobertos pelos pontos de acesso ativos. O modelo matemático para este problema e suas restrições serão detalhados na seção 5.3 desta dissertação.

## 5.2.2 *Balanceamento de Carga*

Os esquemas de alocação de clientes comumente empregados não consideram a questão do balanceamento de carga. Como foi discutido na seção 4.2, isso pode levar a uma queda de desempenho da rede, devido à sobrecarga de alguns AP. Para atenuar esse problema, é necessário considerar o balanceamento da rede como um dos critérios de projeto. Além disso, devem ser atendidos os limites de largura de banda de cada um dos pontos de acesso.

O primeiro passo para se obter uma rede balanceada é definir a carga atual de cada um dos pontos de acesso da WLAN. Esta carga pode ser determinada pela somatória da demanda de banda de todos os clientes alocados a este AP. A equação (5.10), presente na seção 5.3, descreve a carga dos pontos de acesso da rede.

Para equilibrar a carga dos pontos de acesso da rede, este trabalho emprega um índice de balanceamento ( $I\beta$ ) da WLAN, que indica o nível de compartilhamento da largura de banda da WLAN. Esse índice foi calculado utilizando-se a vazão média agregada obtida por todos os clientes de cada AP. O  $I\beta$  da rede pode ser obtido por meio da expressão (5.11) que, por sua vez, foi adaptada de [35]. No caso de todos AP ativos possuírem o mesmo *throughput*, o índice de balanceamento da rede será 1. Se os pontos de acesso estiverem muito desbalanceados, este índice tende a  $1/n$ . O objetivo é maximizar  $I\beta$ , juntamente com a intensidade de sinal presente nos clientes, satisfazendo as restrições técnicas do problema de planejamento de WLAN, descritas na seção 5.2.5.

## 5.2.3 *Distância Cliente - Ponto de Acesso*

Em um ambiente sem barreiras, quanto mais próximo um cliente se encontra do ponto de acesso, maior será a intensidade de sinal recebido pelo mesmo. Essa afirmação pode ser comprovada por meio das expressões contidas na seção 5.1. Sabe-se o RSSI afeta o desempenho de uma transmissão, sendo que quanto maior a sua intensidade, maior será a velocidade de operação do cliente com o ponto de acesso. Além disso, clientes que se conectam a redes com maior intensidade de sinal desfrutam de uma conexão com mais qualidade e mais estável.

Deste modo, é possível fazer uma clara correlação entre a distância em que os clientes da WLAN se encontram do ponto de acesso e a qualidade de serviço experimentado pelos mesmos. Essas afirmações justificam a necessidade de minimizar as distâncias clientes-AP na fase de planejamento das redes locais sem fio.

## 5.2.4 Atribuição de Canais

Conforme mencionado na seção 4.3, o problema de alocação de canais em redes sem fio pode ser tratado como um problema de coloração de grafos. Ao modelar esse problema como um grafo  $G=(V, E)$ , o conjunto dos AP que formam a rede são considerados vértices do grafo ( $V =\{ap_1, ap_2, \dots, ap_n\}$ ) e a interferência causada pela sobreposição da cobertura de dois APs adjacentes é representada por uma aresta ( $E$ ). As cores do grafo denotam o número de canais  $K$  não sobrepostos disponíveis nas redes IEEE 802.11. O objetivo do problema de coloração é obter uma configuração, de modo que nenhum vértice adjacente utilize a mesma cor. Como foi descrito nas seções 2.2.1 e 4.3, sabe-se que em uma WLAN ESS densa, esta configuração não é possível, já que existem apenas três canais de operação que podem ser utilizados sem que haja interferência entre os pontos de acesso de uma WLAN.

Com base nestas observações, para definir uma atribuição canal eficiente foi necessário estender a formulação teórica do problema de coloração de grafos para um problema de coloração de grafo ponderado. Esta abordagem permite a reutilização de canais não sobrepostos para os pontos de acesso vizinhos. Nesta variante ponderada, cada vértice do grafo corresponde a um AP distinto como antes. No entanto, cada aresta no grafo agora tem um peso associado, e este peso indica a importância do uso de cores diferentes (canais) para os vértices adjacentes.

Desta forma o problema de atribuição de canais nas WLAN pode ser modelado da seguinte maneira: Sejam  $W(ap_i)$  o peso de um  $ap_i$  em função da carga consumida pelos clientes associados a este AP e  $I(ap_i, ap_j, \dots)$  a interferência causada por dois ou mais AP operando no mesmo canal  $K$ . Um canal  $K(ap_i) \in V$  é um mapeamento  $K:V \rightarrow \{1 \dots 3\}$ , a partir do conjunto de vértices para o conjunto dos três canais não sobrepostos disponíveis. Pode-se dizer que  $I(ap_i, ap_j) = 0$ , se os pontos de acesso  $i$  e  $j$  estão configurados em canais não interferentes entre si ou se a distância entre eles é superior ao dobro do raio de cobertura de um AP. Caso contrário,  $I$  será maior que 0, e deverá haver algum critério para escolha dos canais entre os pontos de acesso da rede.

O problema da atribuição de canais consiste em encontrar um mapeamento  $K$  de cores, que minimize a reutilização dos canais não interferentes entre si e reduzir o impacto das interferências causado por tais reutilizações entre os pontos de acesso sobre o desempenho do usuário da rede, levando em consideração a demanda de carga de cada AP. A formulação matemática deste problema também é descrita na seção 5.3.

### 5.2.5 Restrições Técnicas

O planejamento de uma WLAN está relacionado com as seguintes restrições técnicas:

- Um cliente só pode ser atendido se a distância do mesmo até o ponto de acesso for menor que o raio de cobertura do AP.
- A largura de banda total demandada ao ponto de acesso da rede deve ser menor ou igual à sua capacidade máxima de largura de banda disponível.
- Existem apenas três canais não interferentes entre si que podem ser atribuídos aos pontos de acesso da rede que operam no padrão IEEE 802.11g.
- A área de serviço da WLAN deve atender a uma quantidade de clientes igual ou superior ao fator de cobertura definido pelo projetista da rede.

## 5.3 Modelagem Matemática

Conforme já foi discutido, este trabalho separa o planejamento de redes WLAN em dois subproblemas, a saber: o problema localização de pontos de acesso e balanceamento de carga da WLAN e o problema de atribuição de canais. A modelagem matemática de cada um desses problemas é descrita a seguir:

### 5.3.1 Problema 1 – Localização de AP e Balanceamento de carga em WLAN

O primeiro problema visa encontrar a melhor localização dos pontos de acesso e a melhor política de associação cliente-AP tendo em conta três critérios: minimização da quantidade de pontos de acesso, minimização do desequilíbrio de carga dentre os pontos de acesso e minimização da distância de atendimento do cliente.

Dados os seguintes parâmetros:

- $(x_j^c, y_j^c)$ : coordenadas do cliente  $j$ .
- $d_j$ : Demanda de banda do cliente  $j$ .
- $f_{cob}$ : fator de cobertura desejado.

Deseja-se encontrar os valores ótimos para as seguintes variáveis de decisão do problema:

$X = [x_1, x_2, \dots, x_N]$  Vetor de coordenadas  $x$  dos AP, sendo  $x_i$  a coordenada  $x$  do  $AP_i$

$Y = [y_1, y_2, \dots, y_N]$  Vetor de coordenadas  $y$  dos AP, sendo  $y_i$ : coordenada  $y$  do  $AP_i$

$V = [v_1, v_2, \dots, v_N]$  Vetor de ativação dos  $N$  AP. Se  $v_i = 1$ , então o  $AP_i$  está ativo. Caso contrário,  $v_i = 0$ .

$C = \begin{bmatrix} c_{1,1} & c_{1,2} & \dots & c_{1,Nc} \\ c_{2,1} & c_{2,2} & \dots & c_{2,Nc} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{N,1} & c_{N,2} & \dots & c_{N,Nc} \end{bmatrix}$  Matriz que associa cada cliente a um ponto de acesso. Se  $c_{i,j} = 1$ , então o cliente  $j$  é atendido pelo  $AP_i$ . Caso contrário,  $c_{i,j} = 0$ .

Seguindo as seções 5.2.1, 5.2.2, 5.2.3 e 5.2.5, o problema de localização de pontos de acesso e balanceamento de carga em redes WLAN fica modelado da seguinte forma:

$$X^* = \arg \min_{X, Y, V, C} \begin{cases} N_{AP}(V) \\ IB(V, C)^{-1} \\ TDist(X, Y, V, C) \end{cases} \quad (5.8)$$

Sujeito a:

$$x_i \in [x_{min}, x_{max}] \quad \forall i \in \{1, \dots, N\} \quad (5.9)$$

$$y_i \in [y_{min}, y_{max}] \quad \forall i \in \{1, \dots, N\} \quad (5.10)$$

$$v_i \in \{0,1\} \quad \forall i \in \{1, \dots, N\} \quad (5.11)$$

$$c_{i,j} \in \{0,1\} \quad \forall i \in \{1, \dots, N\}, \forall j \in \{1, \dots, Nc\} \quad (5.12)$$

$$c_{i,j} = 0 \text{ se: } \sqrt{(x_i - x_j^c)^2 + (y_i - y_j^c)^2} > R_{AP} \text{ ou } v_i = 0 \quad \forall i \in \{1, \dots, N\}, \forall j \in \{1, \dots, Nc\} \quad (5.13)$$

$$\sum_{i=1}^N c_{i,j} \leq 1 \quad \forall j \in \{1, \dots, Nc\} \quad (5.14)$$

$$B_i \leq LB_{AP} \quad \forall i \in \{1, \dots, N\} \quad (5.15)$$

$$\frac{1}{Nc} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{Nc} c_{i,j} \geq f_{cob} \quad (5.16)$$

Onde:



$$N_{AP}(V) = \sum_{i=1}^N v_i \quad (5.17)$$

$$IB(V, C) = \frac{(\sum_i^n B_i)^2}{(N_{AP}(V) \cdot \sum_i^n (B_i)^2)} \quad (5.18)$$

$$TDist(X, Y, V, C) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{Nc} v_i \cdot c_{i,j} \cdot \sqrt{(x_i - x_j^c)^2 + (y_i - y_j^c)^2} \quad (5.19)$$

$$B_i = v_i \cdot \sum_{j=1}^{Nc} c_{i,j} \cdot d_j \quad (5.20)$$

As restrições 5.9 e 5.10 se referem aos limites do espaço onde estão sendo planejados os AP. As restrições 5.11 e 5.12 garantem que as variáveis  $v_i$  e  $c_{i,j}$  são binárias. A restrição 5.13 garante que o  $AP_i$  só poderá cobrir o ponto de demanda  $j$  caso o ponto de acesso esteja ativo e a distância entre eles seja menor que o raio do AP. Já a restrição 5.14 assegura que um cliente esteja associado a no máximo um ponto de acesso. A restrição 5.15 garante que a capacidade máxima do ponto de acesso não seja excedida (54 Mbps no caso da rede 802.11g). A última restrição do problema (5.16) garante que a cobertura mínima estabelecida seja atendida. Caso essas restrições sejam atendidas, os clientes terão sua demanda atendida e boa qualidade de serviço. Caso contrário, poderão ocorrer problemas de desempenho e estabilidade na WLAN, além da possibilidade da ausência de sinal de rede em determinados locais.

A função objetivo,  $N_{AP}$  tem o intuito de minimizar o número de pontos de acesso ativos na rede para atender a cobertura estipulada. Já a função  $IB$  busca a maximização do índice de balanceamento da rede. Por fim, o objetivo de  $TDist$  é maximizar a intensidade de sinal presente nas estações clientes.

### 5.3.2 Problema 2 - Atribuição de Canais em WLAN

Dada uma configuração de pontos de acesso oferecida pela solução do Problema 1, o segundo problema consiste em encontrar o melhor arranjo de canais para estes pontos de acesso.

A variável de decisão  $K$  define um mapeamento de canais atribuídos aos pontos de acesso da rede, de modo que:

-  $K = [k_1, k_2, \dots, k_N]$ , onde  $k_i$  é o canal alocado ao ponto de acesso  $i$ .

O intuito da função objetivo do problema 2 é minimizar a interferência entre os pontos de acesso por meio da atribuição adequada dos canais. Além disso, essa interferência deve ser ponderada pela carga dos pontos de acesso, de forma que a interferência em AP mais carregados tenha maior impacto na função objetivo.

Assim, o problema de atribuição de canais em WLAN, descrito nas seções 4.3 e 5.2.4, pode ser modelado como segue:

$$K^* = \arg \min_K \sum_{i=1}^{N-1} v_i \cdot \left\{ r_i \cdot B_i + \sum_{j=i+1}^N v_j \cdot t_{ij} \cdot [B_j + w \cdot I(AP_i, AP_j)] \right\} \quad (5.21)$$

Sujeito a:

$$k_i \in \{1,2,3\} \quad \forall i \in \{1, \dots, N\} \quad (5.22)$$

Onde:

$$t_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{se } \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \leq 2 \cdot R_{AP} \text{ e } K_i = K_j \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (5.23)$$

$$r_i = \begin{cases} 1, & \text{se } \exists j \neq i \mid \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \leq 2 \cdot R_{AP} \text{ e } K_i = K_j \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (5.24)$$

$$I(AP_i, AP_j) = \frac{1}{\sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}} \quad (5.25)$$

A restrição (5.22) se refere ao limite de canais não sobrepostos, que no caso deste problema são três. Assim, os canais 1, 2 e 3 referem-se aos canais 1, 6 e 11 de uma rede WLAN.

Os termos  $t_{ij}$  e  $r_i$  indicam a ocorrência de interferência em algum ponto da WLAN, quando dois AP que operam em um mesmo canal  $k$  localizam-se a uma distância superior a duas vezes o raio do ponto de acesso. Já a expressão 5.25 representa a interferência existente entre os pontos de acesso  $i$  e  $j$ , mensurada pelo inverso da distância entre eles.

## 6 Abordagem para Resolução do Problema

Nesta seção é apresentado o AG real multiobjetivo proposto para alocação de pontos de acesso em redes WLAN. Este algoritmo é baseado no NSGA-II e considera como critérios de projeto a minimização do número de pontos de acesso utilizados, a minimização do desequilíbrio da rede e a maximização da intensidade de sinal recebida pelas estações clientes. No caso do algoritmo desenvolvido, a RSSI presente nas estações clientes é representada pela distância AP - cliente, em metros. O desenvolvimento e particularidades do algoritmo proposto são discutidos no restante desse capítulo.

### 6.1 Representação das Soluções e População Inicial

Alguns dos parâmetros necessários para realizar um correto planejamento de uma WLAN são a dimensão do ambiente e o raio de cobertura de um AP. Assim, por meio de cálculos geométricos, foi possível estimar a quantidade mínima pontos de acesso necessários para que se obtenha a cobertura desejada em uma determinada área de serviço. Estes cálculos foram extraídos da dissertação de Martins [41], como é mostrado na sequência:

Sejam:

$r_{ap}$  - raio de cobertura de um ponto de acesso.

$A_{ap}$  - área coberta por um ponto de acesso.

$\gamma$  - fator de correção devido à área a ser monitorada ser de forma retangular e a área de cobertura de um AP ser circular.

$A_m$  - área a ser monitorada.

$f_{cob}$  - fator de cobertura que se deseja em  $A_m$ . Sendo que  $\{f_{cob} \in \mathfrak{R} \mid 0 < f_{cob} \leq 1\}$

$n_{AP}$  - estimativa da quantidade mínima de AP necessários para cobrir uma determinada área.

A área coberta por um ponto de acesso é dado em (6.26):

$$A_{ap} = \pi r_{ap}^2 \quad (6.26)$$

O fator de correção  $\gamma$  é calculado por meio da área de um quadrado inscrito na circunferência de raio igual ao raio de cobertura do ponto de acesso empregado na rede WLAN. Portanto:

$$\gamma = \frac{\pi}{2} \quad (6.27)$$

De posse desses dados, é possível estimar a menor quantidade de pontos de acesso que devem ser disponibilizados para cobrir uma determinada área de serviço, como mostrado em (6.28).

$$n_{AP} = \left( \frac{A_m \times f_{cob}}{A_{ap}} \right) \times \gamma \quad (6.28)$$

Por meio da expressão (6.28), foi possível obter o número mínimo de pontos de acesso necessários para garantir a cobertura desejada de uma área de serviço em uma WLAN. Entretanto, conforme descrito na seção 5.2, o problema de planejamento de WLANs possui mais de um objetivo, e vai além da minimização do número de pontos de acesso, garantindo que a restrição de cobertura seja atendida.

Apesar desse número mínimo de pontos de acesso garantir a cobertura desejada, ele não garante o cumprimento de outros requisitos da rede, como atendimento das demandas dos clientes e manutenção do equilíbrio. Por essa razão, muitas vezes faz-se necessário instalar mais pontos de acesso que os estimados utilizando a abordagem descrita acima. Com base nestas considerações, optou-se por adotar uma quantidade máxima de pontos de acesso  $N$  que seja duas vezes a quantidade mínima estimada. Essa quantidade  $N$  de AP não significa necessariamente que a rede WLAN será saturada de pontos de acesso, já que o algoritmo implementado considera o emprego de uma técnica de controle de redundância, que será discutida na próxima seção.

Para definir o posicionamento dos pontos de acesso da rede, foi empregada a codificação real dos indivíduos, de modo que cada indivíduo da população seja composto de  $2N$  genes reais, que representam as coordenadas de instalação ( $x$  e  $y$ ) dos  $N$  possíveis pontos de acesso (vide Figura 15). Essa abordagem permite que o AGMO implementado encontre soluções eficientes e que atendam às restrições do problema em um espaço de soluções contínuo.

1	2	3	4	5	6	...	2N-1	2N
15.4	56.3	7.9	66.1	28.8	98.4	...	37.4	114.1
$X_1$	$Y_1$	$X_2$	$Y_2$	$X_3$	$Y_3$	...	$X_N$	$Y_N$

Figura 15 - Representação de um indivíduo

Sabe-se que durante a inicialização da população de um algoritmo genético, diferentes técnicas podem ser empregadas. Um método comumente empregado nos algoritmos genéticos é a inicialização aleatória da população, pois esta permite uma maior variabilidade dos resultados obtidos [37]. No entanto, esta técnica possui a desvantagem de possibilitar a ocorrência de áreas com concentração de pontos e outras áreas completamente descobertas [30]. Isso é extremamente desfavorável na alocação de pontos de acesso, uma vez que soluções com essas características dificilmente representam alternativas factíveis.

Para contornar este problema, foi empregada uma estratégia durante a fase de geração da população inicial do algoritmo implementado que divide a população inicial da seguinte maneira:

- 2/3 dos indivíduos da população inicial foram gerados de forma completamente aleatória.
- os indivíduos restantes foram criados por meio uma heurística que divide o espaço a ser coberto em células, de igual área, e distribui aleatoriamente os N pontos de acesso restantes dentro dessas células, conforme a Figura 16. Espera-se, com esse perfil de geração, garantir cobertura ampla do espaço e variabilidade do conjunto de soluções.

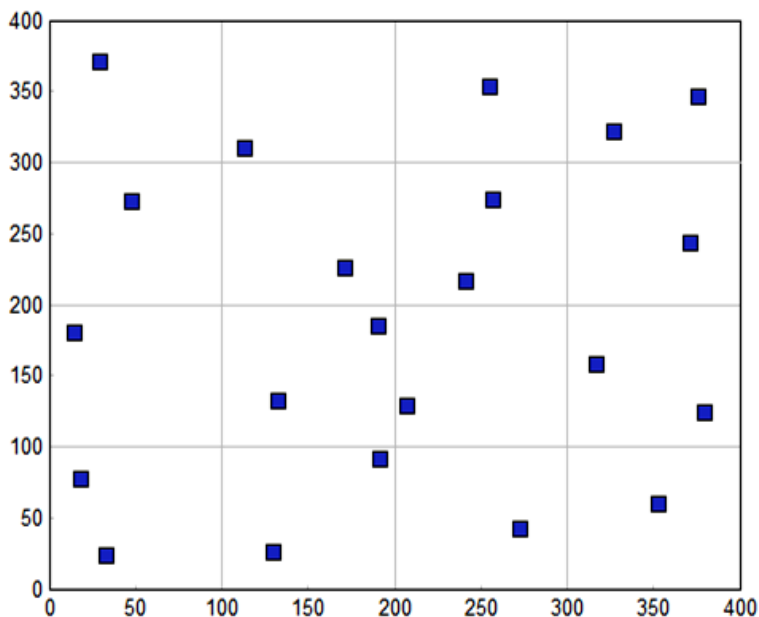


Figura 16 - Criação de soluções iniciais

## 6.2 Decodificação e Avaliação dos Indivíduos

Tendo em vista que o número de pontos de acesso representados no indivíduo é maior que o mínimo necessário para garantia da cobertura, entende-se que é possível obter soluções que atendam esses requisitos com um número de AP menor que  $N$ . Baseado nesta consideração, foi proposta uma técnica de controle de redundância que define quais os AP do indivíduo devem ser efetivamente instalados.

A técnica empregada para definir se um AP será ou não instalado foi um vetor binário de ativação. Este vetor é associado ao indivíduo, sendo que seu comprimento é  $N$ . Cada posição desse vetor pode assumir os valores “0” (zero), indicando que o respectivo AP será desconsiderado ou “1” (um), representando que um AP será instalado. Um exemplo de vetor desse tipo pode ser visto na Figura 17.

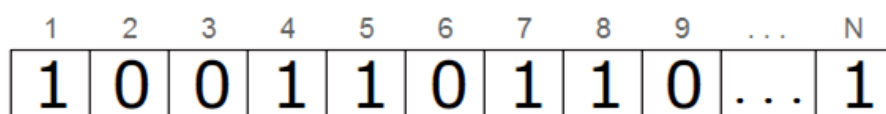


Figura 17 - Exemplo de um vetor de ativação de  $N$  bits

O vetor de ativação e as variáveis do indivíduo são ordenados de forma a garantir que os pontos de acesso com maior carga demandada no seu raio de cobertura ocupem sempre as últimas posições. Dessa forma, foi possível implementar a seguinte heurística para desabilitar pontos de acesso na rede:

- inicialmente, todos os pontos de acesso são ativados;
- um operador percorre o vetor de ativação desabilitando os AP um a um, seguindo a ordem estabelecida no passo anterior;
  - a cada AP desabilitado, verifica-se se a nova solução é capaz de atender a cobertura estabelecida, sendo que, caso essa restrição não se cumpra, o AP é então habilitado novamente;
- o processo se repete até a verificação do último ponto de acesso, que pode ser desabilitado sem comprometer a cobertura mínima estipulada para a área de serviço.

A principal vantagem desse mecanismo é eliminar a instalação de pontos de acesso que não irão contribuir de forma significativa para a cobertura ou o equilíbrio das cargas.

Após a definição do conjunto de pontos de acesso ativos é realizada a associação entre os

clientes e os AP, de forma a garantir o atendimento da cobertura e realizar o balanceamento de carga. Inicialmente, cada cliente é associado ao AP mais próximo, visando garantir que cada usuário da rede disponha da maior intensidade de sinal possível. Na sequência, uma heurística para realocação de clientes é aplicada, visando encontrar uma relação favorável entre a intensidade de sinal e a carga dos dispositivos concentradores da rede:

- inicialmente, são identificados todos os clientes associados a cada um dos pontos de acesso disponíveis;
- para cada um desses clientes, buscam-se quais AP ativos que estão operando com menos de 90% da sua capacidade e são capazes de atender o cliente a uma distância menor que 90% do seu raio de cobertura;
  - nessa regra, o cliente  $j$  é deslocado para o ponto de acesso  $i$  que minimiza a relação  $L$  (equação 6.29), dentre os pontos de acesso que atendem aos requisitos acima citados.

$$L = 1.2 \times distancia(i, j) + cargaAP(i) \quad (6.29)$$

O pseudocódigo do algoritmo de balanceamento de carga é exibido a seguir:

---

### *Pseudocódigo para balanceamento de carga*

---

$N$ : número de pontos de acesso  
 $cargaAP_i$ : carga de um ponto de acesso  $i$   
 $dist_{(i,j)}$ : distância ( $AP_i \leftrightarrow cliente_j$ )  
 $r$ : raio de cobertura do AP  
 $L_{(i,j)}$ : relação  $dist_{(i,j)}$  e  $cargaAP_i$  - (equação 6.14)

```

1  para cada  $i \in N$  faça
2      se  $cargaAP_i > 18 Mbps$  então
3          Percorrer todos  $J$  clientes ligados ao  $AP_i$ 
4          para cada  $k \in J$  faça
5              para cada  $t \in N$  faça
6                  se  $(dist_{(t,k)} \leq 0.9 \times r) \ \& \ (cargaAP_t \leq 0.9 \times 54Mbps) \ \& \ (AP_t = ativo)$  então
7                      se  $L_{(i,k)} > L_{(t,k)}$  então
8                           $novoAP_k = t$ 
9                  Selecionar melhor AP do vetor  $novoAP_k$ 
10                 Alterar associação  $cliente \leftrightarrow AP$ 
11                 Atualizar cargas dos  $AP_i$  e  $AP_t$ 

```

---

O mecanismo de balanceamento de carga é empregado apenas aos AP que estiverem acima de 1/3 da sua capacidade, uma vez que os AP pouco demandados não apresentam grandes problemas para a rede. Além disso, essa restrição reduz o tempo computacional necessário para o algoritmo realizar o balanceamento.

Após esta etapa, foi possível equilibrar a carga da rede entre os pontos de acesso, mantendo a ocupação máxima da WLAN sem extrapolar as cargas dos pontos de acesso.

### 6.3 Seleção dos Indivíduos

O método de seleção adotado para o NSGA-II implementado foi a seleção por torneio, descrito em [28]. Esse mecanismo de seleção por torneio determina quais indivíduos farão parte da população de progenitores, que irão participar do processo de cruzamento ou mutação. Esse método escolhe aleatoriamente  $k$  indivíduos da população, compara os valores de suas funções de aptidão (*fitness*) e declara como vencedor aquele indivíduo que superar o(s) outro(s). Esse processo é repetido  $N$  vezes, onde  $N$  é o número total de indivíduos da população.

No caso dos AGMO, os indivíduos da população não têm sua *fitness* representada por uma medida escalar. No caso deste trabalho, cada indivíduo deve ser avaliado de acordo com os três objetivos, descritos na seção 5.3. Por este motivo, na fase de seleção por torneio, os indivíduos são selecionados e comparados de acordo com os conceitos de dominância de Pareto, abordado na seção 3.2. Assim, se uma solução  $S1$  domina  $S2$ ,  $S1$  vence o torneio, e vice-versa.

Porém, na otimização multiobjetivo, ocorrem casos em que não existe relação de dominância entre duas soluções. Neste caso, um terceiro critério, denominado distância de multidão (seção 3.3.3.2), deverá ser empregado para determinar o melhor dos indivíduos.

### 6.4 Cruzamento

No algoritmo proposto, foi adotado o Cruzamento Binário Simulado (do inglês *Simulated Binary Crossover* ou SBX), conforme proposto em [13]. Como o próprio nome sugere, o cruzamento SBX tem comportamento semelhante ao operador de cruzamento de um ponto de corte, comumente utilizado para a codificação binária.



O SBX trabalha com dois indivíduos pais ( $p^1$  e  $p^2$ ) e gera dois novos descendentes  $q^1$  e  $q^2$ , a partir da seguinte expressão (6.30):

$$q^1 = \frac{1}{2}((1 + \beta)p^1 + (1 - \beta)p^2)$$

$$q^2 = \frac{1}{2}((1 - \beta)p^1 + (1 + \beta)p^2)$$
(6.30)

Onde:

$\beta$  é um valor aleatório, obtido por meio de (6.31).

$$\beta = \begin{cases} (2u)^{\frac{1}{n+1}} & : \text{se } u \leq 0.5 \\ \left(\frac{1}{2(1-u)}\right)^{\frac{1}{n+1}} & : \text{caso contrário} \end{cases}$$
(6.31)

Em (6.31):

$u$  é um valor aleatório uniforme, gerado no intervalo  $[0,1]$ .

$n$  é o índice de forma da distribuição.

Com base em (6.30) e (6.31), é possível notar que o cruzamento SBX utiliza uma distribuição de probabilidade não uniforme, com dois centros definidos pelos dois indivíduos pais. Seguindo essa distribuição, os descendentes têm maiores chances de serem gerados nas regiões vizinhas aos pais, como mostra a Figura 18 (adaptada de [45]). Por sua vez, a abrangência das regiões de vizinhança é definida pelo índice de forma da distribuição,  $n$ :

- Quando  $n$  diminui, o raio de abrangência aumenta, aumentando a chance de se obter pontos distantes dos pais.
- Quando  $n$  aumenta, o raio de abrangência diminui, reforçando a localidade do operador.

Uma descrição mais detalhada desse operador pode ser encontrada em [13].

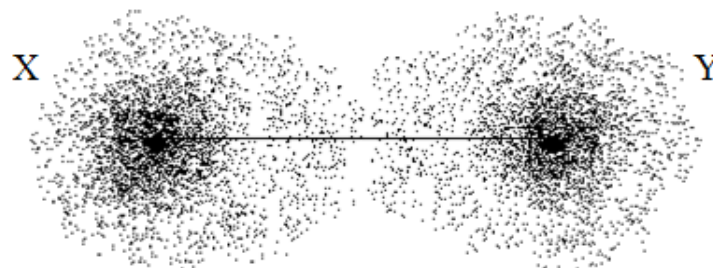


Figura 18 - Aproximação de centro nos dois indivíduos pais X e Y

## 6.5 Mutação

O operador de Mutação Polinomial, proposto em [14] como Polynomial Mutation, foi empregado no AG proposto neste trabalho. Nesse operador, a mutação de uma dada variável  $x_i$  é realizada seguindo a equação 6.32:

$$x_i^m = x_i + \delta \cdot \Delta_{max} \quad (6.32)$$

Onde:

$x_i^m$  é o valor da variável após a mutação.

$\delta$  é a perturbação aplicada a variável  $x_i$ .

$\Delta_{max}$  é a diferença entre os limites máximo e mínimo da variável  $x_i$ .

Por sua vez, a perturbação  $\delta$  é calculada utilizando (6.33), como segue:

$$\delta = \begin{cases} (2u)^{\frac{1}{n+1}} & : se u < 0.5 \\ 1 - [2(1-u)]^{\frac{1}{n+1}} & : se u \geq 0.5 \end{cases} \quad (6.33)$$

Onde:

$u$  é um valor aleatório uniforme, gerado no intervalo  $[0,1]$ .

$n$  é o índice de forma da distribuição.

A perturbação gerada por esse operador tem média zero e variância dependente do índice de forma  $n$ . A Figura 19, retirada de [14], ilustra essa distribuição para diferentes valores de  $n$ . É possível notar que, quanto maior o valor de  $n$ , menor a variância da distribuição e, conseqüentemente, menor a perturbação esperada para a variável. De forma simétrica, quanto menor o índice  $n$ , maior a variância de  $\delta$ , e maior a probabilidade de se obter valores mais distantes do original  $x_i$ .

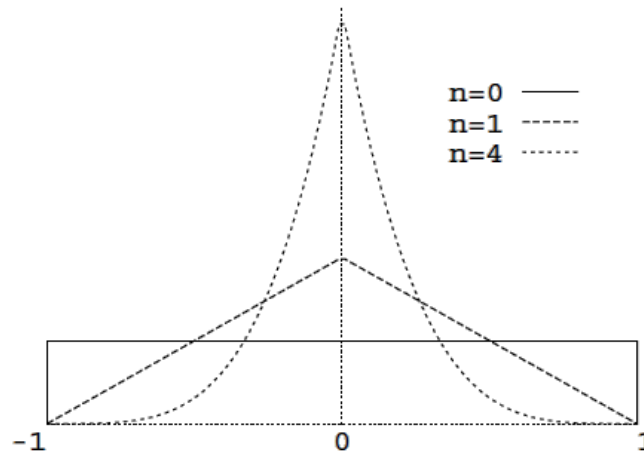


Figura 19 - Distribuição polinomial usada para diferentes parâmetros  $n$ .

Por fim, o nome do operador se deve ao fato da variável aleatória  $\delta$  seguir uma distribuição de probabilidade polinomial, função essa mostrada na equação 6.34.

$$P(\delta) = 0.5(n + 1)(1 - |\delta|)^n \quad (6.34)$$

## 6.6 Avaliação dos Indivíduos

Conforme descrito na seção 3.1, a aptidão de um indivíduo permite analisar o quão boa é uma solução. No caso dos AGMO, para avaliar corretamente o grau de aptidão dos indivíduos da população, ou seja, a qualidade das soluções, a aptidão deve ser calculada de acordo com os objetivos do problema em questão, descritos na seção 5.3. Após consolidada a avaliação dos indivíduos, eles são analisados do ponto de vista das restrições do problema.

Se alguma das restrições do problema é violada, o indivíduo correspondente é penalizado, de modo que sua aptidão seja reduzida. A penalização dos indivíduos será abordada na próxima seção. Após avaliar a qualidade dos indivíduos de uma população, o processo de seleção empregado no algoritmo implementado deverá ser aplicado para escolher os indivíduos que irão participar do cruzamento ou mutação.

## 6.7 Penalização das Soluções Infactíveis

Os operadores de cruzamento e mutação do AG podem gerar a indivíduos que não cumprem com ao menos uma das restrições impostas ao problema. Uma possibilidade para lidar com esse problema é o uso de funções de penalidades, aplicadas sobre as funções objetivo. Assim, durante o processo evolutivo, as soluções infactíveis irão perder prioridade no processo de seleção, pois seu valor de aptidão será piorado. No entanto, o uso dessa estratégia deve ser feito com cautela, já que uma escolha errada no grau da penalidade aplicada pode atuar negativamente na convergência do algoritmo.

No caso específico do problema de planejamento de redes WLAN, uma solução pode ser considerada infactível em dois casos:

- não atendimento da cobertura pré-estabelecida;
- não atendimento dos limites de capacidade dos pontos de acesso.

As outras restrições do problema não foram tratadas por penalidade, pois elas são necessariamente atendidas pela codificação, operadores e heurísticas adotados. Para lidar com as soluções infactíveis, foram ajustadas funções de penalidade, apresentadas em (6.35) e (6.36).

$$P1 = \sum_{i=1}^{nAP} \max(1, \exp^{(0.05 \times (B_i^{ap} - 54))}) \quad (6.35)$$

$$P2 = \max(1, \exp^{(0,5 \times (fcob - cobertura))}) \quad (6.36)$$

A expressão P1 (6.35) penaliza soluções que utilizam pontos de acesso com carga superior a 54 Mbps. Já a equação P2 (6.36) aplica uma penalidade às soluções que não atendem a restrição de cobertura estipulada. Como o mecanismo que desativa os AP sempre atende à restrição de cobertura, apenas as soluções que utilizam todos os pontos de acesso poderão ser penalizadas por P2.

As duas funções de penalidade foram agregadas à função objetivo que minimiza o desbalanceamento de carga da rede e à função que minimiza a distância entre os AP e os clientes da rede. Se uma solução não violar nenhuma dessas restrições citadas anteriormente, o valor da penalidade para a mesma será igual a 1. Caso contrário, o valor de P1 ou P2 aumenta de forma exponencial. Ao final do cálculo da penalidade, a mesma é multiplicada ao valor das duas funções objetivo citadas anteriormente, visando piorar a aptidão das soluções infactíveis.

## 6.8 Atribuição de Canais

O problema da atribuição de canais é uma questão importante nas redes WLAN ESS. Contudo, quando o número de canais disponíveis para a atribuição é inferior que o grau máximo do grafo, este é um problema comprovadamente NP-hard, [38],[47]. Assim, ainda não foi descoberto um algoritmo exato capaz de solucionar este problema de coloração em tempo polinomial. Esse aspecto dificulta a correta atribuição de canais em redes locais sem fio grandes, onde existe uma alta densidade de AP dentro da área de interesse.

Devido à complexidade dos problemas abordados nesta dissertação, optou-se por realizar a operação de alocação dos canais após a execução do NSGA-II, para cada uma das soluções presentes na aproximação do conjunto de Pareto encontrada. Essa escolha também se justifica pelo fato de não ser interessante realizar alterações no *layout* de uma WLAN já definida em função das limitações de canais usados por essas redes, pois existem métodos eficientes para contornar as interferências. Além disso, movimentações erradas no posicionamento dos AP poderiam acarretar queda no desempenho na rede, e provocar áreas de sombra na rede.

O primeiro passo para definir a correta distribuição de canais entre os AP da rede é construir um grafo de interferência, identificando todos os pontos de acesso que causam interferência entre si, conforme é ilustrado na Figura 20. Uma vez construído o grafo de interferência, utiliza-se alguma técnica de coloração de grafos, limitado aos três canais não interferentes existentes.

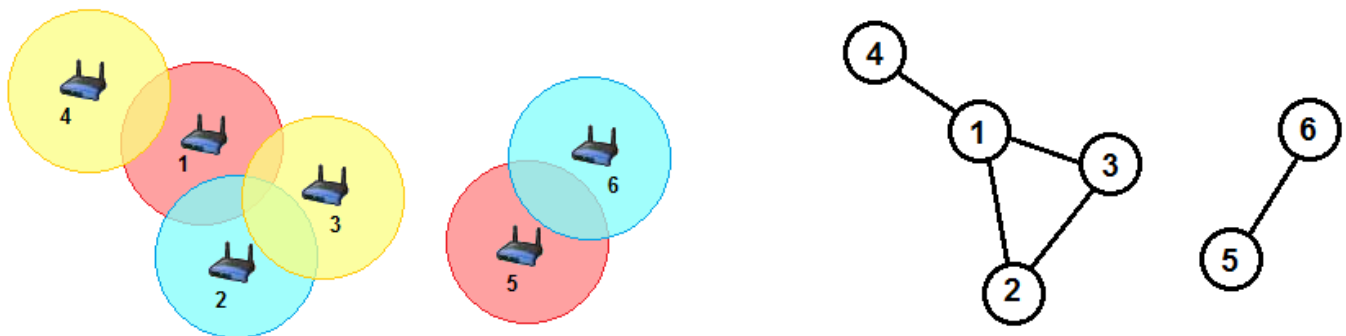


Figura 20 - Configuração de WLAN / grafo de interferência

Após o estudo de vários métodos comumente empregados, optou-se por utilizar a heurística gulosa DSATUR (*degree of saturation*) como base para a construção de um algoritmo de atribuição de canais. Essa heurística é determinística e vem sendo usada em trabalhos que tratam da alocação de frequência em redes sem fio [17],[24],[38]. O algoritmo DSATUR estabelece a ordem em que os nós (AP)

devem ser coloridos e as cores (canais) são atribuídas. Em cada iteração do algoritmo, o nó com maior grau de saturação (o maior número de vizinhos) é selecionado para ser colorido. Se mais de um nó tem o mesmo grau de saturação, então é selecionado aquele com maior número de vizinhos coloridos.

No entanto, o projeto de WLAN baseados em cenários onde há grande concentração de usuários, requer um maior número de AP próximos para suprir a demanda de tráfego. Nestes casos, torna-se inevitável a reutilização de canais, devido às limitações já citadas na seção 2.2.1. Isso faz com que o algoritmo DSATUR original torne-se pouco eficiente para a aplicação aqui proposta, uma vez que ele não leva em conta nem a carga dos pontos de acesso e nem o nível de interferência existente entre eles.

Para tratar essas limitações, foi proposta uma heurística gulosa que consiste em uma variação ponderada do algoritmo DSATUR, em que é considerada a reutilização de canais para pontos de acesso vizinhos. O objetivo é reduzir o impacto de tais atribuições sobre o desempenho da rede. Foram definidos pesos para os vértices (AP) e arestas (borda de cobertura dos pontos de acesso) da WLAN. Esses pesos correspondem respectivamente à carga de um dado ponto de acesso e a interferência causada entre eles, representada pela distância entre pontos de acesso vizinhos. O pseudocódigo do algoritmo desenvolvido para alocação dos canais é apresentado a seguir:

---

### *Pseudocódigo para atribuição de canais*

---

$n_{AP}$ : número de vértices do grafo  
 $canais$ : número de canais não-sobrepostos  
 $V$ : vetor contendo os vértices  $v$  do grafo  
 $v_{adj}$ : vértices adjacentes a  $v$   
 $G$ : grau dos vértices  
 $cor$ : canal atribuído a um AP

```

1  Calcular Matriz de interferência da rede
2  Calcular  $G$  do grafo
3  Ordenar  $V$  de acordo com  $G$ 
4      Se  $G_{vi} = G_{vi+1}$ , ordenar  $V$  pela maior carga;
5  para cada  $i \in n_{AP}$  faça
6      para cada  $j \in canais$  faça
7          se  $cor_i \neq cor_{v_{adj}}$  então
8               $cor_i = j$ 
9      se  $cor_i = \phi$  então
10         Selecionar todos  $v_{adj}$  de  $v_i$ 
11         para cada  $v_{adj} \in V$  faça
12             Escolher  $v_{adj}$  mais distante de  $v_i$  e menos carregado
13              $cor_i = cor_{v_{adj}}$ 

```

---

Uma das diferenças do algoritmo implementado para o DSATUR está na seleção para coloração do vértice com o mesmo grau, que no caso do algoritmo desenvolvido, prioriza os pontos de acesso com maior carga. Para os casos em que ocorre a reutilização de canais entre AP vizinhos, o algoritmo busca uma relação favorável entre a interferência entre os AP operando no mesmo canal e a carga dos mesmos. O objetivo é encontrar o canal com menor interferência, levando em consideração os canais já utilizados pelas células vizinhas. Esse procedimento é realizado para todos os AP vizinhos com o mesmo canal. A heurística desenvolvida fornece boas aproximações da solução ideal, com a vantagem de apresentar baixa complexidade computacional.

## 7 Resultados e Discussões

Neste capítulo são apresentados estudos experimentais em diferentes aspectos do problema de planejamento de redes locais sem fio. A primeira parte dos testes explora quatro condições plausíveis de projeto de uma WLAN plana. Os resultados obtidos pelo AG multiobjetivo desenvolvido são avaliados por meio de uma análise de repetibilidade da resposta obtida pelo algoritmo, com o intuito de estimar a sua robustez. A segunda parte dos experimentos apresenta um estudo dos efeitos da variação da demanda de tráfego exigida pelos usuários e de suas localizações, em cada um dos cenários, fornecendo uma avaliação de desempenho do esquema proposto. A última etapa dos testes compara os resultados obtidos pelo algoritmo desenvolvido com outro método para posicionamento de AP, a fim de estimar a eficiência dos mecanismos propostos nesse trabalho.

### 7.1 Cenários de Teste e Perfil dos Usuários

Para realizar um correto planejamento de uma WLAN, é necessário mensurar a quantidade de usuários que irão usufruir dos recursos da rede, identificar suas necessidades, locais onde poderá haver concentrações desses usuários, além de considerar as restrições impostas pelo ambiente a ser coberto. Esta abordagem permite aos projetistas de rede determinar o número e o posicionamento dos pontos de acesso da rede, além da correta associação dos usuários aos AP. Assim, para conduzir os experimentos desta dissertação, foram propostos quatro cenários de teste distintos. Em todos os cenários foi simulada a necessidade de se atender uma rede WLAN plana, com uma demanda de 400 clientes em uma área de serviço com a extensão de  $160.000 m^2$ .

No primeiro cenário todos os 400 pontos de demanda foram dispostos em uma grade bidimensional igualmente espaçada (*grid*). No cenário 2, os 400 pontos de demanda foram distribuídos de forma aleatória, seguindo distribuição de probabilidade uniforme. Nos cenários 3 e 4, buscou-se reproduzir locais onde ocorrem aglomerações de usuários como, por exemplo, centros de convenções, Shopping Centers e aeroportos. No cenário 3, foram criados três aglomerações de 100 pontos cada, com pontos centrais distintos, utilizando uma distribuição gaussiana. Além disso, foram distribuídos outros 100 pontos seguindo uma distribuição uniforme. Já no quarto cenário, foram criados apenas 2 clusters



com 150 pontos cada e os 100 pontos restantes também foram distribuídos seguindo distribuição uniforme. Este último cenário possui um grau de dificuldade maior, quando comparado aos demais, pois fatores negativos como interferência de canais, desequilíbrio de carga e custo da solução são ampliados. A Figura 21 exibe os diferentes cenários citados, representando potenciais usuários no ambiente proposto.

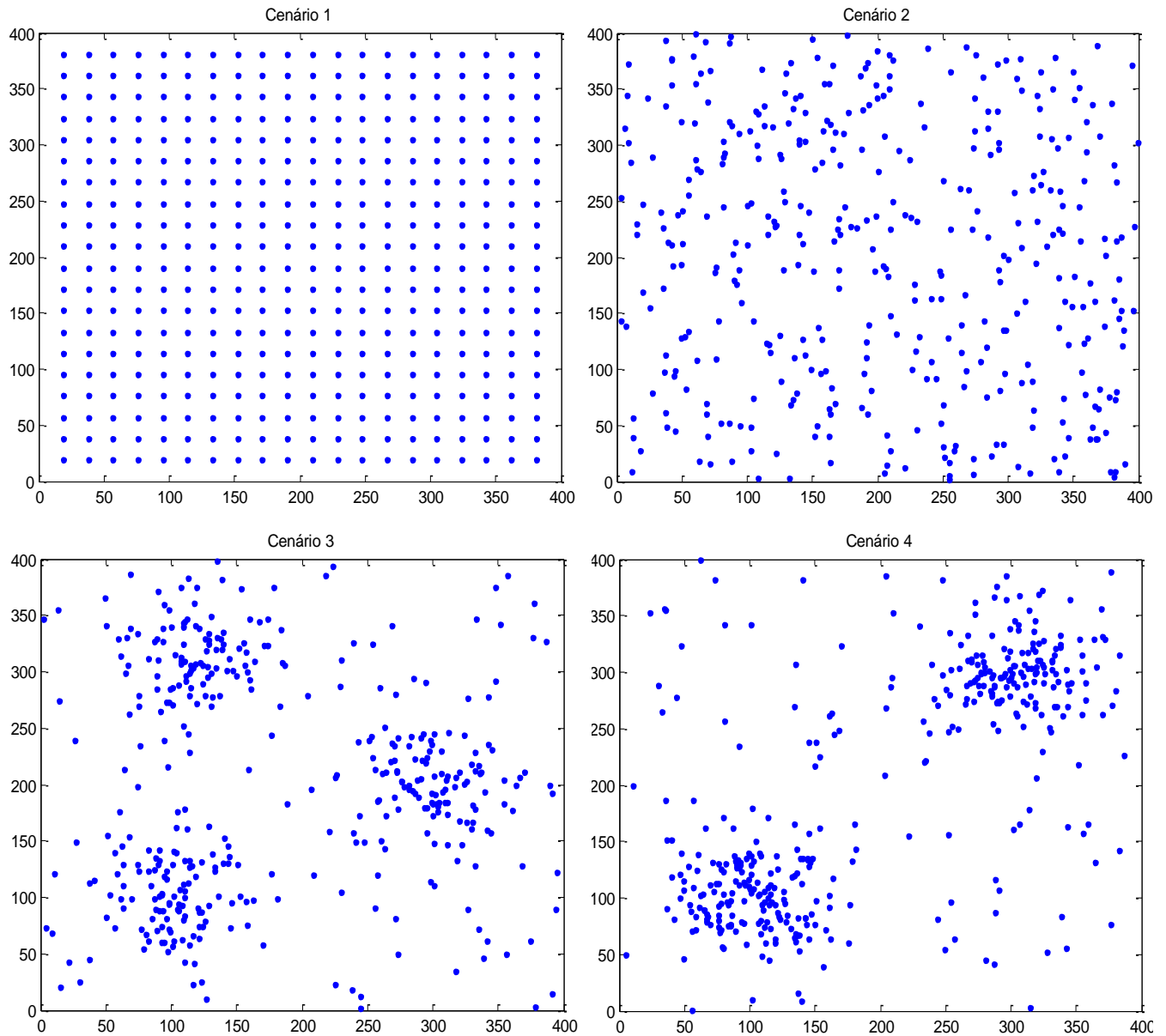


Figura 21 - Cenários de teste

Para avaliar as técnicas desenvolvidas nesta dissertação, considera-se imprescindível a utilização de cargas diferenciadas de trabalho, baseadas no comportamento dos usuários e no

desempenho da rede sem fio em questão. Assim, para aproximar o modelo desenvolvido da realidade de uma WLAN atual, os clientes foram criados com uma demanda de tráfego aleatória, variando entre 20 Kbps a 3 Mbps, seguindo distribuição uniforme. Esta variação na demanda de tráfego contextualiza diversos níveis de atividade dos usuários da rede. Desta forma, diferentes necessidades são consideradas no projeto, que vão desde o acesso a páginas web até a realização de videoconferências ou de chamadas de voz sobre IP (VoIP).

## 7.2 Parâmetros de Configuração dos Experimentos

### 7.2.1 Parâmetros de Entrada do Problema

Os testes realizados utilizaram como base o padrão IEEE 802.11g, que é o mais utilizado hoje. Nestes experimentos, emprega-se o modelo de perda de percurso *log-distance*, descrito na seção 5.1.1, para estimar as características propagação de rádio no ambiente especificado. Os experimentos conduzidos neste trabalho consideram o planejamento em uma área de serviço interna sem barreiras.

O modelo *log-distance* para o cálculo da perda de percurso, descrito em detalhes na seção 5.1.1, será repetido aqui, para facilitar seu entendimento:

$$L(\mathbf{d}) = L(d_0) + 10 \times n \times \log_{10} \left( \frac{d}{d_0} \right) + X_\delta$$

onde  $d$  é a distância do transmissor,  $L(d_0)$  é a perda de propagação de referência a um metro de distância em dB. No caso das redes 802.11 com frequência de 2,4 GHz,  $L(d_0) = 40,2 \text{ dB}$ . O valor de  $n$  refere-se ao expoente da perda de percurso, que especifica o comportamento da perda para um ambiente particular, e  $X_\delta$  é uma variável que representa a margem de desvanecimento.

Com base nestas informações, foi utilizado nos experimentos,  $n=2$ , já que as ondas eletromagnéticas propagam no espaço livre [51]. Conforme estipulado na fase de planejamento da WLAN, para prover uma disponibilidade de 99% de cobertura, uma margem de desvanecimento de 6 dB deve ser aplicada no cálculo da perda de percurso [54], assim  $X_\delta = 6$ . Os outros parâmetros da entrada foram selecionados baseados nas características da área de serviço a qual a WLAN poderá ser instalada. Por meio dos cálculos aplicados ao modelo *log-distance* é possível estimar a perda por propagação de uma distância desejada. Assim, essa perda será:

$$L(\mathbf{85}) = 84,78 \text{ dB.}$$

Conforme descrito na seção 2.2.3, foram considerados pontos de acesso com potência de irradiação de 100 mW. Se esta potência de transmissão for convertida para decibéis, teremos  $20_{dBm}$ . Além disso, será considerado que todos os AP da rede utilizam antenas do tipo omni-direcionais, com um ganho de 2 dBi. Deste modo, se estes valores forem empregados para obter a intensidade de sinal recebida (RSSI) a uma dada distância, será possível definir se uma comunicação entre o cliente e AP será realizada com eficiência.

A expressão a seguir, que também está sendo repetida aqui, foi detalhada na seção 5.1.2 e é empregada para estimar a intensidade de sinal recebida nas estações clientes.

$$RSSI = Potência (tx)_{dBm} + ganho\ antenna (tx)_{dBi} - L(d)_{dB}$$

Optou-se por adotar nessa expressão uma distância máxima de 85 metros, sendo que esta distância é suficiente para os clientes da rede desfrutarem de uma conexão estável com o ponto de acesso. Então, se calcularmos a intensidade de sinal recebida no cliente, utilizando os parâmetros supracitados, teremos:  $RSSI = -62,78_{dBm}$ . De acordo com a maioria dos fabricantes de equipamentos wireless padrão IEEE 802.11g, este valor é suficiente para a rede local sem fios operar em uma velocidade de 54 Mbps.

Sabe-se, que na fase de planejamento de WLAN, o cálculo da RSSI é a principal métrica para estimar a área de cobertura dos AP. No entanto, para tornar o algoritmo implementado mais simples, iremos adotar nesta dissertação a medida em metros para definir o raio de cobertura do ponto de acesso. Os parâmetros de entrada para o problema de planejamento de WLANs estão resumidos na Tabela 1.

Tabela 1 - Dados do problema

Parâmetro	Valor
Dimensão do ambiente	400m x 400m
Fator de cobertura	99%
Raio de alcance do AP	85 metros
Capacidade do AP	54 Mbps
Número de usuários wireless	400

## 7.2.2 Parâmetros de execução do algoritmo implementado

O AGMO implementado foi executado por 100 gerações em todos os cenários com uma população contendo 50 indivíduos. Cada indivíduo é composto de 44 variáveis, sendo as coordenadas  $x$  e  $y$  de 22 pontos de acesso. Conforme já foi descrito, foi empregado o operador SBX, com índice de forma da distribuição igual a 1.4 e probabilidade de ocorrência igual a 0.80 (para cada par de variáveis do indivíduo).

Para a mutação, foi empregado o operador de mutação polinomial estático com  $n = 20$ . Foi adotada uma probabilidade de mutação igual a 0.1 (para cada gene do cromossomo). Um resumo desses parâmetros pode ser visto na Tabela 2:

Tabela 2 – Parâmetros de execução do NSGA-II.

Parâmetro	Valor
Tamanho do cromossomo	44 genes reais (22 pontos de acesso)
Número de gerações	100
Tamanho da população	50 indivíduos
Probabilidade de cruzamento	0.8 (por par)
Probabilidade de mutação	0.1 (por gene real)

Vale ressaltar que a escolha desses parâmetros foi feita de forma empírica, com base na experimentação de vários conjuntos.

Os experimentos conduzidos nesta dissertação foram realizados em Matlab® versão 2010a [44], utilizando um microcomputador com processador Intel Core2Duo 2.0 GHz, 4 GB de memória RAM e sistema operacional Windows 7.

## 7.3 Análise dos Resultados

Neste tópico serão apresentados os resultados obtidos da aplicação do AG multiobjetivo proposto neste trabalho. Os testes computacionais estão divididos em três etapas. A primeira análise realizada é referente às soluções de planejamento de WLAN que o algoritmo desenvolvido forneceu. Para cada cenário proposto, serão apresentadas quatro alternativas plausíveis de projeto. Estas propostas variam de acordo com o número de pontos de acesso empregados na rede sem fios e tratam da localização e balanceamento de carga dos pontos de acesso, além de exibir a alocação de canais

sugerida. Nas figuras que representam o planejamento da rede local sem fios, as cores (azul, vermelho e verde) correspondem aos canais 1, 6 e 11 respectivamente. Estes canais foram atribuídos em uma segunda etapa, para cada uma das soluções eficientes obtidas, seguindo o esquema de alocação proposto na seção 6.8. Os resultados que serão apresentados ao longo desse capítulo são resultados de uma execução típica dentre dezenas de execuções.

Por ser uma fase importante, a segunda etapa dos testes será explicada em detalhes na próxima seção. Na terceira etapa, será realizada uma análise de repetibilidade da resposta obtida pelo AG, com o intuito de estimar a sua robustez. Ainda nesta fase, serão realizados testes comparativos com o algoritmo de agrupamento K-means. Para cada um dos cenários, compara-se as aproximações da fronteira Pareto encontradas para cinco execuções do NSGA-II com as soluções obtidas pelo K-means. Detalhes desses testes serão abordados na seção 7.3.6.

No teste comparativo, tanto para o NSGA-II quanto para o K-means, os quatro cenários criados serão sempre os mesmos a serem utilizados pelo algoritmo, ou seja, não haverá alterações no perfil da demanda gerada. Isto é válido para o posicionamento dos usuários da rede e para a demanda de banda exigida pelos clientes. Esta característica torna-se fundamental para realizar comparações com os algoritmos aqui apresentados e para comparar as diferentes execuções do AGMO desenvolvido em um mesmo cenário. Assim, a possibilidade de favorecimento de um ou outro algoritmo é eliminada.

### ***7.3.1 Variações no perfil de acesso***

Uma das conveniências de uma WLAN ESS é a mobilidade oferecida aos usuários. Estudos realizados em [5] indicam que em ambientes como auditórios, *hotspots* e redes WLAN públicas, de 50 a 70% dos usuários sem fio são móveis e se conectam em mais de um AP no mesmo dia. Contudo, o padrão de mobilidade dos usuários de uma WLAN privada ou de um campus universitário é diferente. Esses ambientes de rede suportam uma comunidade de usuários conhecida e autorizada *a priori*. Estas características reduzem consideravelmente a mobilidade dos clientes nesses ambientes, já que este acesso ocorre na maioria das vezes em locais habituais.

Entende-se que a mobilidade dos usuários entre pontos de acesso (*handoff*) e as variações no consumo de banda dos clientes da rede são fatores importantes e que devem ser considerados no planejamento de uma WLAN ESS. No entanto, é necessário que o posicionamento dos pontos de acesso da rede seja fixo, já que mudanças no *layout* de uma WLAN podem implicar em gastos adicionais e problemas de cobertura. Assim, a localização dos AP definida pelo algoritmo evolucionário proposto

rede deve ser capaz de suportar a mobilidade dos usuários, sem que haja perda considerável de cobertura.

Desta forma, a terceira etapa dos experimentos consiste em inserir uma perturbação aleatória na localização e na exigência de tráfego de todos os usuários da rede para os cenários 2, 3 e 4. Para cada uma das soluções obtidas, são verificados a cobertura e o índice de balanceamento da rede para um total de 1000 cenários distintos. Estes cenários são criados com o mesmo perfil de geração na qual o algoritmo propôs o planejamento da rede. O objetivo desse teste é avaliar a eficiência do esquema de alocação de AP e balanceamento de carga propostos em diferentes condições.

Este último teste torna-se útil também como um critério de escolha dentre as opções de projeto fornecidas pelo algoritmo genético. Portanto, os índices de cobertura e balanceamento observados nos 1000 cenários avaliados podem ser utilizados para determinar qual a solução mais adequada para a situação.

### 7.3.2 *Cenário 1*

O cenário 1 representa uma situação ideal em termos de planejamento, na qual os clientes de uma *wireless* LAN estão dispostos de maneira uniforme no ambiente. Neste caso, não há concentração de usuários em áreas específicas da rede, o que elimina o problema de desbalanceamento. Porém, sabe-se que este é um cenário hipotético, que não reproduz o real posicionamento dos usuários em uma rede local sem fios. Assim, a solução para esta situação consiste em garantir a cobertura desejada, com o menor número de pontos de acesso, sem extrapolar sua capacidade máxima de largura de banda.

Na Figura 22 são apresentadas as aproximações obtidas para a fronteira Pareto para três objetivos (número de AP, desbalanceamento da rede e distância AP - cliente). Para essas instâncias foram encontradas soluções factíveis variando de 14 a 22 pontos de acesso. Como pode ser visto, o aumento do número de AP melhora o balanceamento da carga e também o RSSI (representado pela distância entre clientes e pontos de acesso) presente nos clientes, como era esperado. Além disso, é possível notar que as soluções com 22 pontos de acesso atingiram um índice de desbalanceamento muito próximo de 1, que é o melhor valor possível.

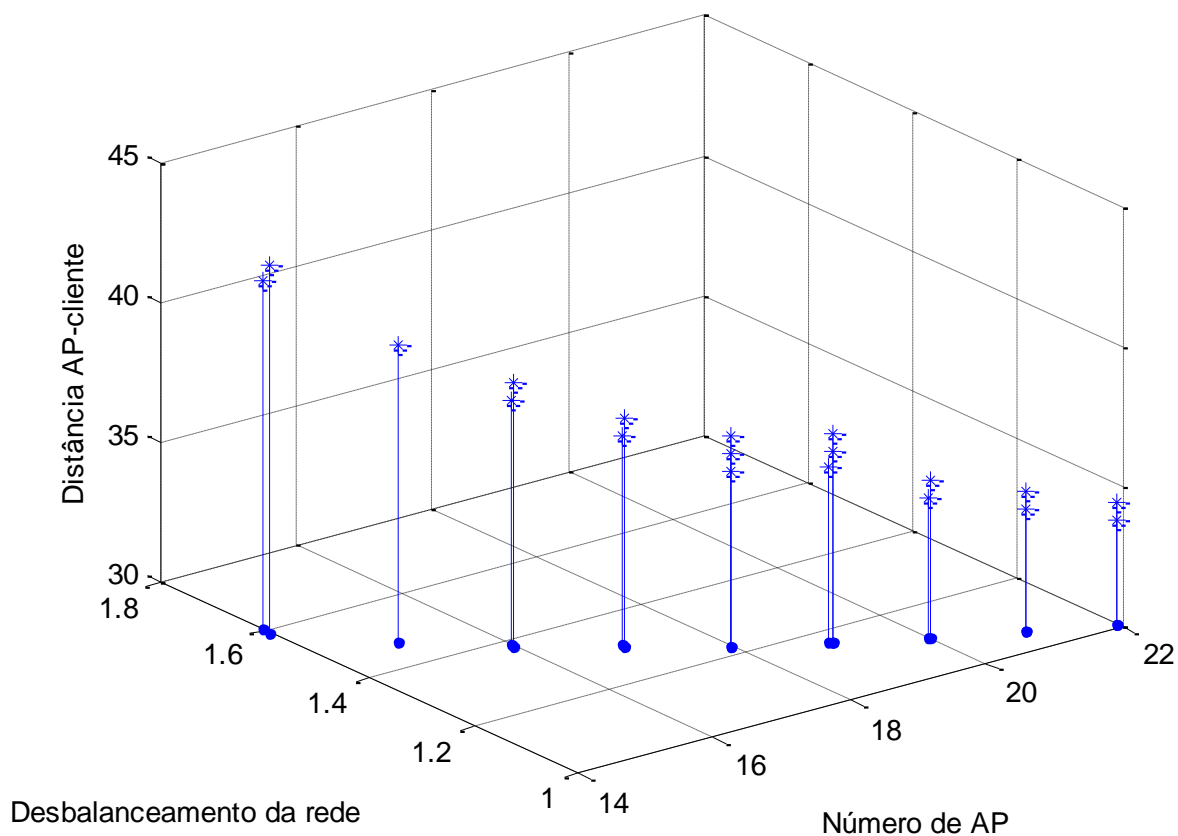


Figura 22 - Soluções obtidas no cenário 1

Na Tabela 3 são exibidos os valores observados para as soluções obtidas no cenário 1. Nesta tabela também é apresentada uma estimativa da interferência observada para cada solução. Essas interferências foram mensuradas após a fase de atribuição de canais, calculando a porcentagem de usuários que são alcançáveis por dois ou mais AP que operam no mesmo canal.

Algumas das soluções obtidas na execução do algoritmo são apresentadas na Figura 23. Essas soluções possuem 14, 16, 18 e 21 pontos de acesso. Na primeira alternativa de projeto, exibida na Figura 23A, 2,5% dos clientes da rede sofrem algum tipo de interferência. Para as redes B, C e D, esses valores são 8%, 12% e 21%, respectivamente. Esse estudo confirma que a probabilidade de ocorrência de interferência em WLAN é maior em uma rede com muitos pontos de acesso, o que também era esperado.

Tabela 3 - Valores das Funções Objetivo - Cenário 1

Solução (#AP)	Desquilíbrio da rede	Distância AP-cliente	Interferência ( % clientes )	
14	1.603	42.5 m	5.3	
<b>14</b>	<b>1.588</b>	<b>43.1 m</b>	<b>2.5</b>	A
15	1.474	40.6 m	7.5	
<b>16</b>	<b>1.387</b>	<b>38.8 m</b>	<b>8.0</b>	B
16	1.381	39.4 m	8.0	
17	1.303	38.1 m	18.5	
17	1.306	37.5 m	12.2	
18	1.227	36.9 m	3.75	
<b>18</b>	<b>1.229</b>	<b>36.2 m</b>	<b>12.0</b>	C
18	1.226	37.5 m	2.0	
19	1.163	37.5 m	20.5	
19	1.163	36.9 m	18.5	
19	1.17	36.2 m	18.0	
20	1.112	35.0 m	27.0	
20	1.105	35.6 m	21.5	
21	1.054	35.0 m	24.0	
<b>21</b>	<b>1.057</b>	<b>34.4 m</b>	<b>21.0</b>	D
22	1.011	33.7 m	30.2	
22	1.009	34.4 m	23.0	

Com base na Figura 23, é possível perceber que o algoritmo foi capaz de fornecer boas alternativas de projeto para o ambiente em questão. Em todas as soluções, o AG distribuiu os pontos de acesso na área de serviço da WLAN de forma adequada, favorecendo os clientes da rede. Além disso, a heurística adotada foi capaz de prover um arranjo adequado das frequências. É visível que, mesmo para as soluções que empregaram muitos pontos de acesso, o algoritmo atribuiu os canais visando sempre reduzir o impacto causado por interferências.

O tempo médio de execução para este cenário foi 40.6 segundos.



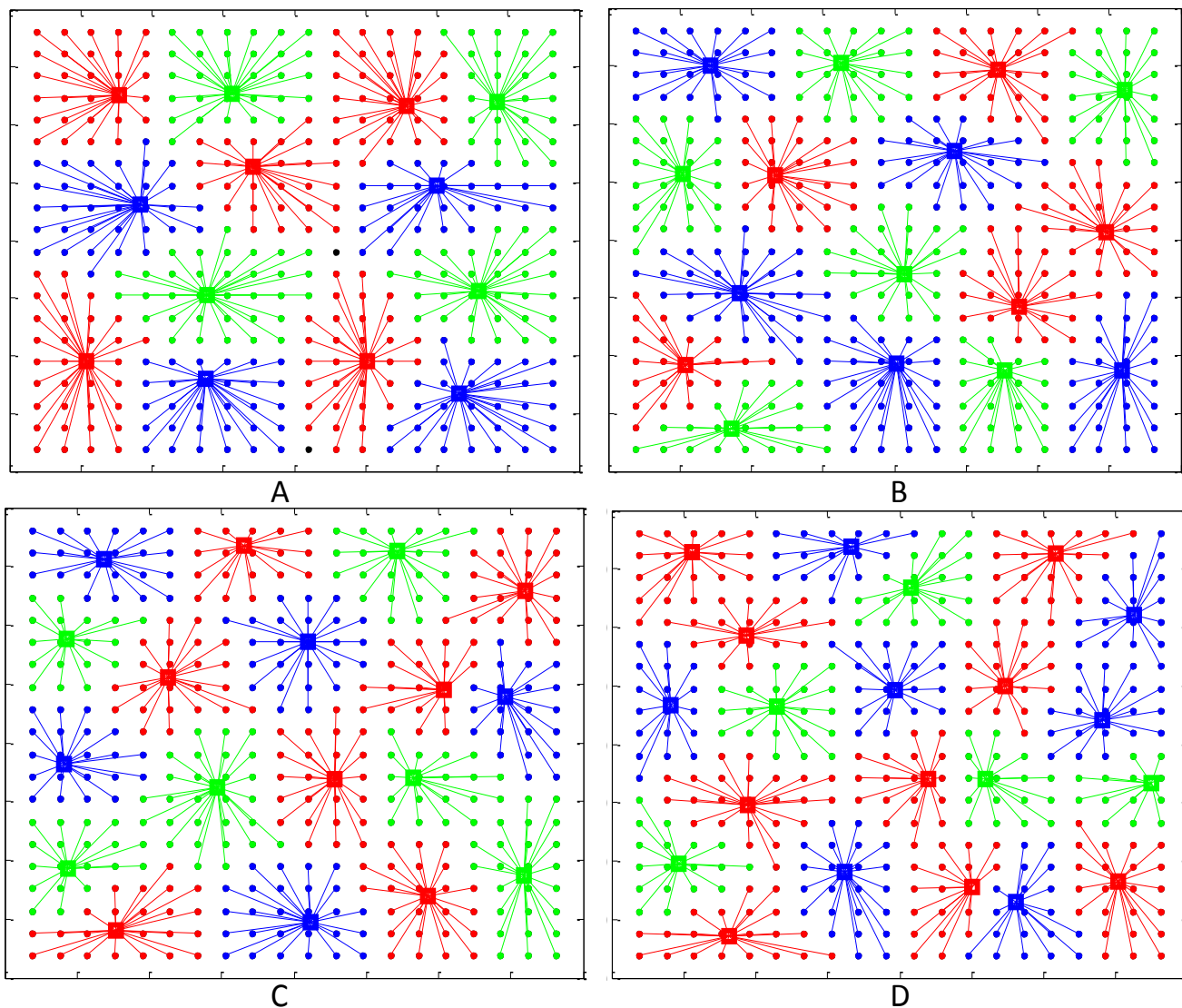


Figura 23 - Alternativas de Projeto - cenário 1

### 7.3.3 Cenário 2

O cenário 2 reproduz um perfil de distribuição dos usuários mais coerente. A aleatoriedade empregada no perfil de geração da demanda foi capaz de criar situações na qual devem ser consideradas algumas áreas de concentração de usuários e ausência destes em outras.

As aproximações obtidas pelo algoritmo proposto são apresentadas na Figura 24. Nessa instância, o algoritmo encontrou 27 soluções, variando de 14 a 22 pontos de acesso. Assim como no cenário 1, a solução com 22 pontos de acesso foi capaz de prover um índice de desbalanceamento muito

baixo, conforme desejado. Assim como no primeiro cenário, fica visível a relação entre o número de pontos de acesso e a distância de atendimento dos clientes.

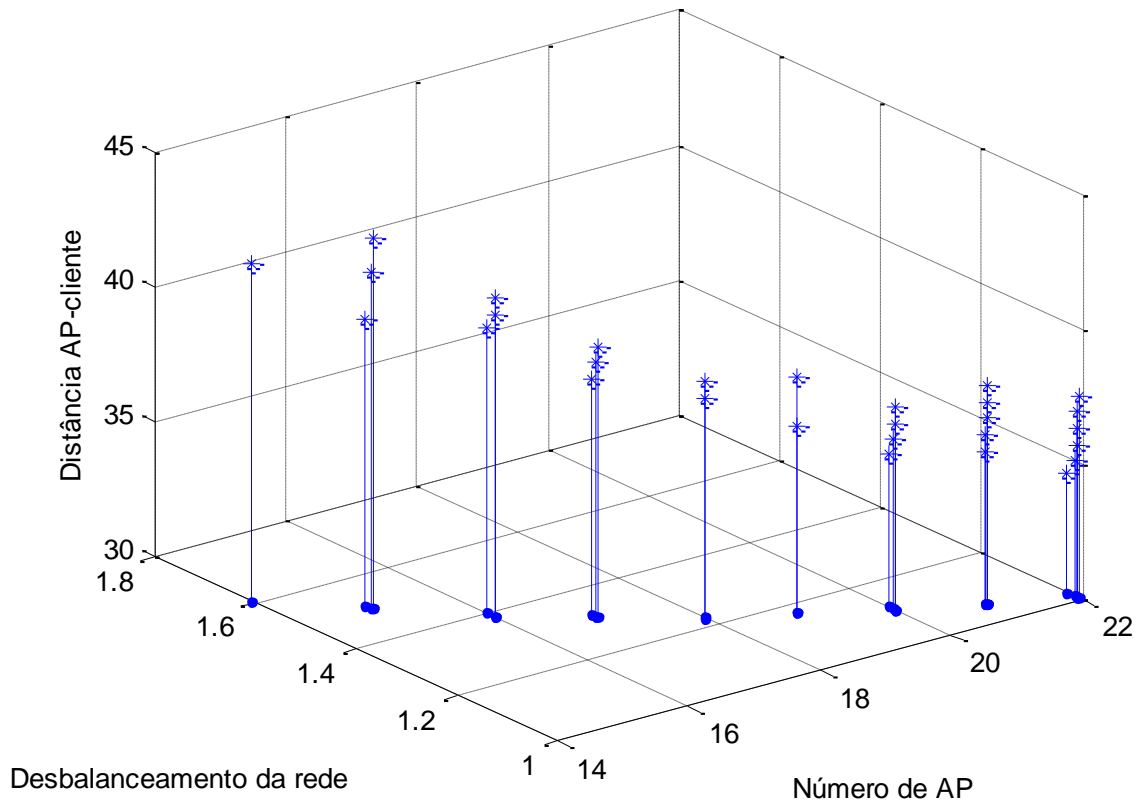


Figura 24 - Soluções obtidas no cenário 2

As soluções obtidas pela Figura 24 são exibidas na Tabela 4. Quatro dessas soluções são destacadas na Figura 25. Essas soluções empregam 15, 17, 19 e 21 pontos de acesso.

Para as soluções A e B, a interferência gerada na rede foi de 4.2% e 3.5%. Já para as soluções C e D, 15.7% e 6.2% dos clientes da rede sofreram interferência proveniente de outros AP da rede.

Uma análise criteriosa das alternativas propostas mostra que o algoritmo conseguiu fornecer boas alternativas de projeto. Assim como no primeiro cenário, a heurística implementada distribuiu os pontos de acesso de forma apropriada, e alocou canais para os AP de modo que a interferência causada fosse moderada.

Tabela 4 - Valores das Funções Objetivo - Cenário 2

Solução (#AP)	Desquilíbrio da rede	Distância AP-cliente	Interferência ( % clientes )	
14	1.607	42.5 m	6.5	
15	1.511	40.6 m	6.5	
15	1.497	43.8 m	8.5	
<b>15</b>	<b>1.498</b>	<b>42.5 m</b>	<b>4.2</b>	<b>A</b>
16	1.385	41.3 m	6.0	
16	1.383	41.8 m	5.7	
16	1.402	40.6 m	13.8	
17	1.308	40.0 m	15.0	
17	1.313	39.4 m	9.0	
<b>17</b>	<b>1.321</b>	<b>38.7 m</b>	<b>3.5</b>	<b>B</b>
18	1.230	38.1 m	17.2	
18	1.227	38.7 m	22.5	
19	1.176	38.8 m	20.5	
<b>19</b>	<b>1.177</b>	<b>36.8 m</b>	<b>15.75</b>	<b>C</b>
20	1.116	36.2 m	11.5	
20	1.123	35.6 m	13.25	
20	1.110	37.5 m	7.5	
21	1.059	36.8 m	15.5	
21	1.062	36.2 m	9.0	
21	1.056	38.1 m	15.0	
<b>21</b>	<b>1.062</b>	<b>35.6 m</b>	<b>6.2</b>	<b>D</b>
21	1.057	37.5 m	18.5	
22	1.008	37.5 m	11.7	
22	1.015	35.0 m	12.7	
22	1.032	35.4 m	20.5	
22	1.008	36.8 m	13.5	
22	1.012	35.6 m	16.5	

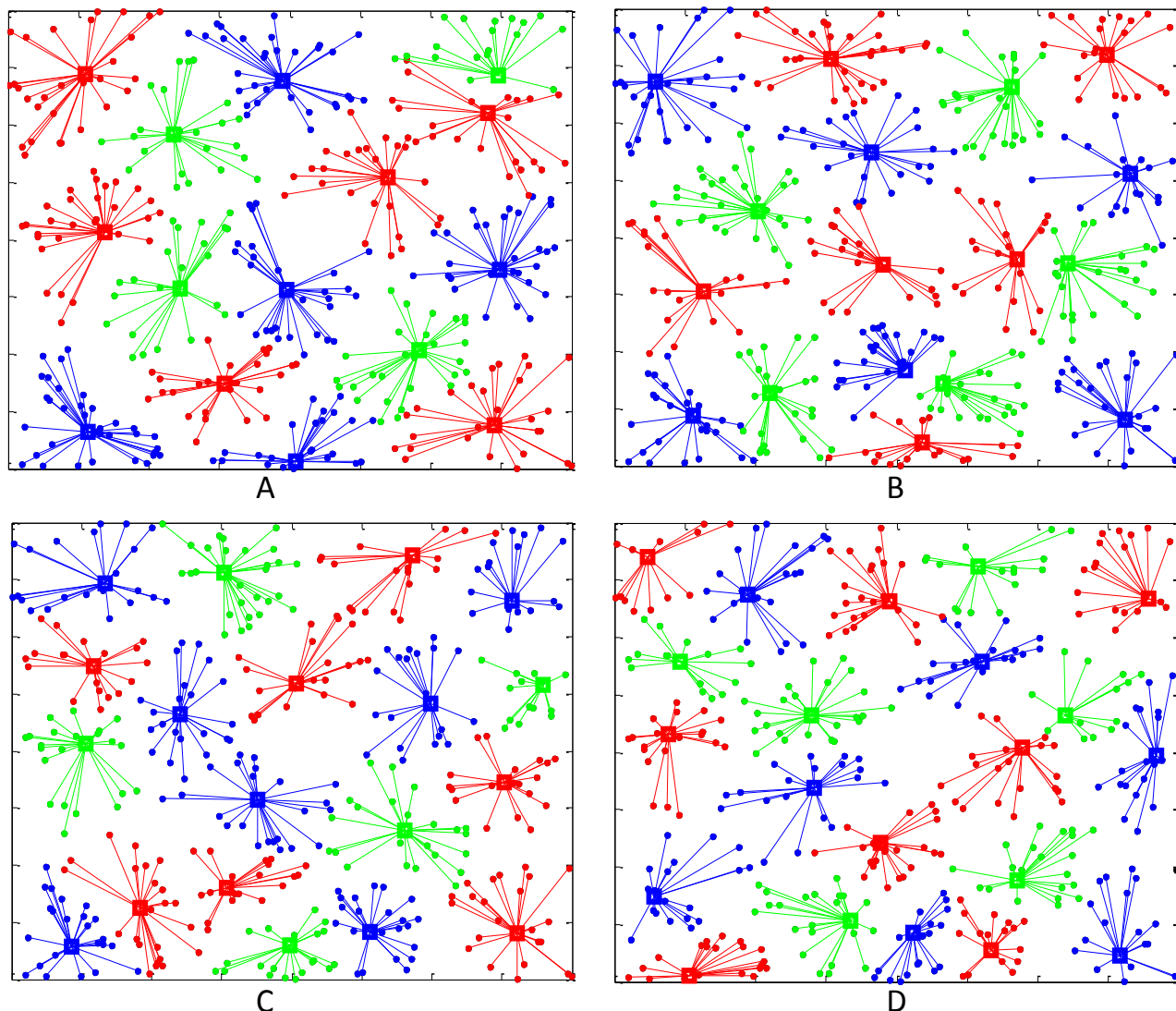


Figura 25 - Alternativas de Projeto - cenário 2

Conforme descrito anteriormente, foi realizado um teste de robustez para cada uma das soluções obtidas para os cenários 2, 3 e 4. Na Tabela 5 são descritos os resultados obtidos nessa análise, referente à cobertura atingida pela solução e desequilíbrio de carga da rede. Na tabela, são exibidos os índices para o pior, o melhor e o caso médio de todos os 1.000 cenários testados, para todas as soluções encontradas pelo algoritmo.

Com base nos resultados dessa análise é possível perceber que a variação do perfil de consumo não ocasionou redução significativa da qualidade das soluções, tendo em vista que não houve queda

considerável de cobertura e equilíbrio, mesmo para o pior cenário observado. O tempo médio gasto para execução do algoritmo no cenário 2 foi de 43.5 segundos.

Tabela 5 - Análise de Robustez - cenário 2

Solução (#AP)	% Cobertura			Desequilíbrio de carga		
	Pior	Média	Melhor	Pior	Média	Melhor
14	95.8	98.2	99.8	1.83	1.66	1.59
15	96.0	98.4	100	1.67	1.54	1.49
15	97.0	98.9	100	1.71	1.56	1.49
15	95.8	98.8	100	1.64	1.53	1.48
16	97.0	99.1	100	1.58	1.46	1.38
16	97.0	98.9	100	1.59	1.46	1.38
16	96.8	98.9	100	1.56	1.45	1.39
17	96.3	98.6	100	1.49	1.37	1.31
17	96.3	98.5	100	1.49	1.38	1.31
17	96.3	99.4	100	1.55	1.38	1.32
18	98.0	99.5	100	1.50	1.29	1.23
18	98.5	99.5	100	1.50	1.28	1.23
19	98.0	99.9	100	1.39	1.22	1.17
19	99.0	99.6	100	1.31	1.22	1.18
20	98.3	99.5	100	1.26	1.17	1.12
20	98.5	99.9	100	1.26	1.16	1.12
20	99.3	99.8	100	1.25	1.17	1.11
21	99.0	99.8	100	1.22	1.13	1.06
21	98.5	99.8	100	1.20	1.12	1.06
21	98.5	99.7	100	1.20	1.12	1.05
21	98.8	99.8	100	1.20	1.12	1.06
21	98.3	99.6	100	1.22	1.11	1.06
22	98.3	99.6	100	1.16	1.07	1.01
22	99.3	99.9	100	1.12	1.06	1.02
22	97.3	99.0	100	1.15	1.08	1.02
22	98.5	99.8	100	1.12	1.06	1.01
22	98.3	99.6	100	1.15	1.07	1.01

### 7.3.4 Cenário 3

Conforme descrito na seção 7.1, o cenário 3 insere uma particularidade importante a ser considerada no projeto de WLAN, a aglomeração de usuários, muito comum em diversos ambientes de rede. Esta característica torna este cenário mais complexo, já que se torna necessário garantir além da cobertura, a qualidade de serviço oferecida aos clientes da rede. Apesar do algoritmo não considerar a interferência ocorrida na rede como um critério para convergência do AG, este deve ser levado em consideração como critério de escolha das soluções obtidas.

As aproximações encontradas pelo algoritmo são exibidas no gráfico a seguir. Neste são exibidas 26 soluções, obtidas pela execução do AG para os três objetivos considerados.

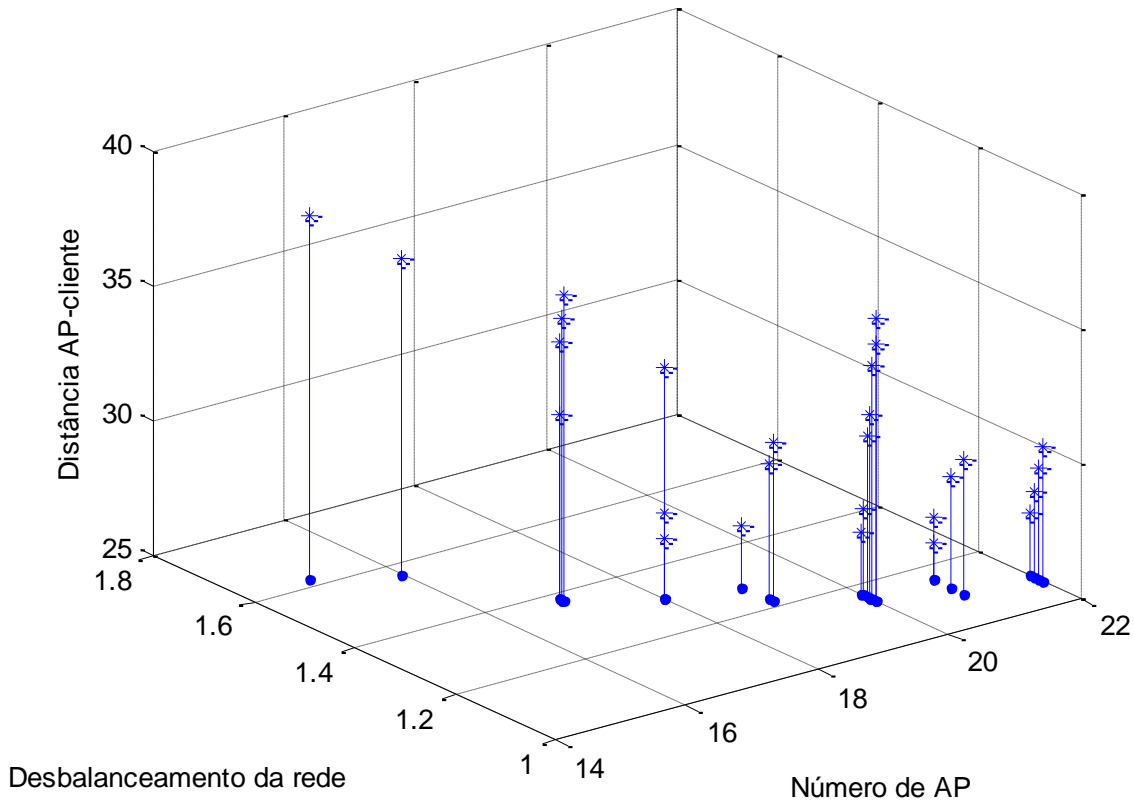


Figura 26 - Soluções obtidas no cenário 3

A Tabela 6 mostra os valores das três funções objetivo do problema para as 26 soluções encontradas, além da interferência observada para estas soluções. Quatro diferentes alternativas foram escolhidas dentre essas 26 soluções, conforme mostra a Figura 26. Essas soluções possuem 14, 16, 19 e 21 pontos de acesso.

Tabela 6 - Valores das Funções Objetivo - Cenário 3

Solução (#AP)	Desquilíbrio da rede	Distância AP-cliente	Interferência (% clientes)	
<b>15</b>	<b>1.617</b>	<b>38.5 m</b>	<b>17.5</b>	A
16	1.566	36.7 m	23.7	
17	1.382	34.5 m	30.0	
<b>17</b>	<b>1.383</b>	<b>31.8 m</b>	<b>30.7</b>	B
17	1.379	35.4 m	39.3	
17	1.374	36.4 m	39.0	
18	1.303	33.6 m	39.5	C
18	1.305	27.3 m	39.0	
<b>18</b>	<b>1.305</b>	<b>28.2 m</b>	<b>38.5</b>	
19	1.219	30.9 m	65.7	D
19	1.228	30.0 m	61.0	
19	1.280	27.3 m	51.8	
20	1.155	33.6 m	54.4	
20	1.146	34.5 m	54.2	
20	1.169	28.1 m	56.2	
20	1.176	27.2 m	55.5	
<b>20</b>	<b>1.157</b>	<b>31.8 m</b>	<b>48.7</b>	
20	1.163	30.9 m	48.7	
21	1.125	29.1 m	62.0	
21	1.099	30.0 m	62.7	
21	1.160	27.3 m	60.5	
21	1.161	26.4 m	56.2	
22	1.084	29.1 m	67.0	
22	1.102	27.3 m	65.7	
22	1.089	28.2 m	65.7	
22	1.074	30.0 m	60.7	

É possível observar que o percentual de clientes na rede que sofrem algum tipo de interferência no cenário 3 aumentou consideravelmente. Na solução apresentada com 15 pontos de acesso esse valor foi 17.5 %. Já na rede com 17 AP, 30.7%. As soluções que empregaram muitos AP foram as mais

prejudicadas: 38.5% para a solução com 18 pontos de acesso e 48.7% para a solução com 20 pontos de acesso.

Percebe-se também, que as soluções atendem à restrição de cobertura, buscam sempre balancear a carga da rede e procuram atender os clientes da WLAN com uma intensidade de sinal adequada. No entanto, as características do cenário 3 trouxeram problemas de interferência na rede.

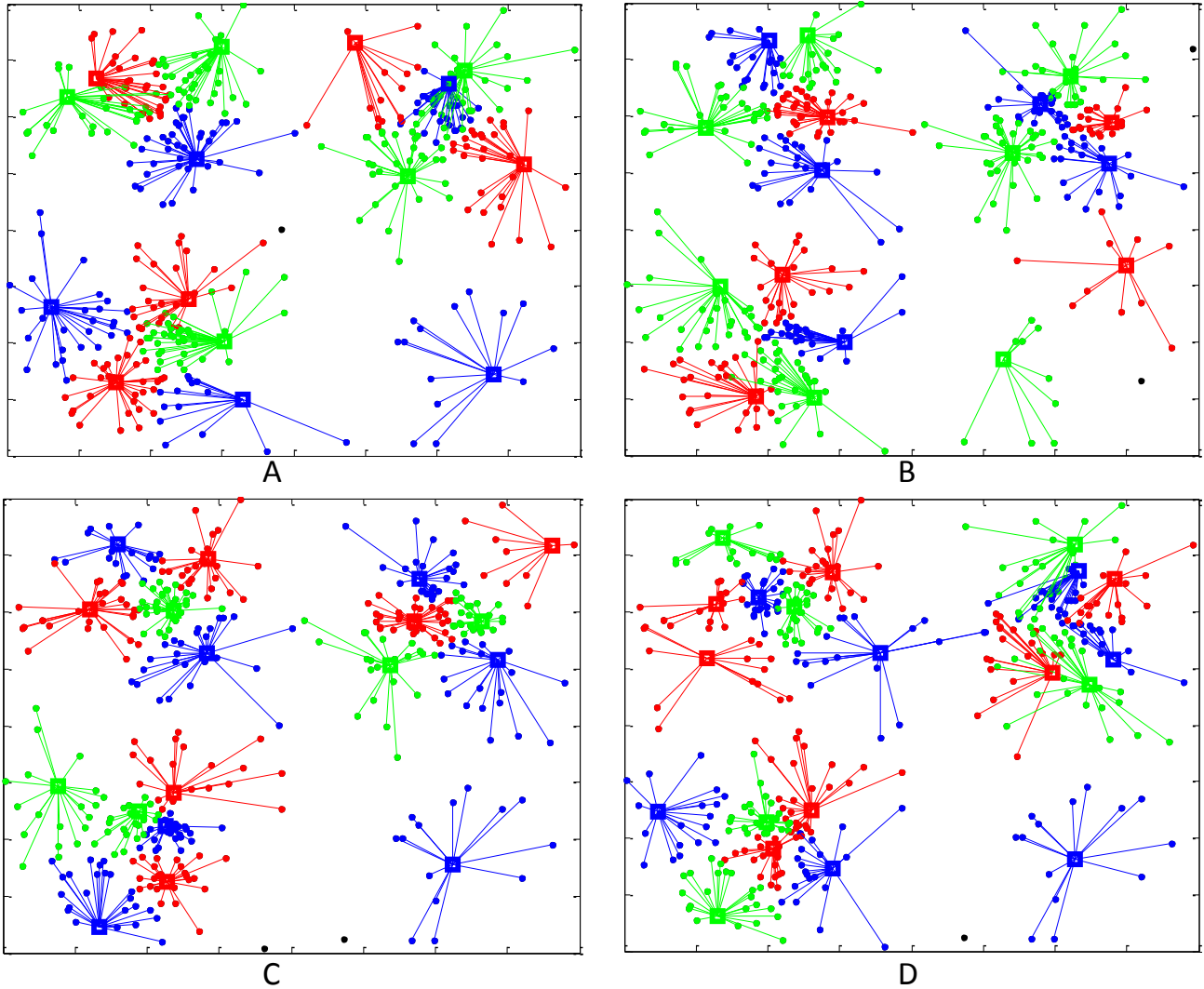


Figura 27 - Alternativas de Projeto - cenário 3

É possível notar que, neste cenário, os pontos de acesso foram alocados em regiões menores do espaço, devido à grande aglomeração de clientes. Apesar de visualmente o algoritmo realizar uma alocação adequada dos canais, ao mensurar as possíveis interferências na rede, percebe-se uma situação desfavorável em algumas soluções, chegando a 67% no pior caso. Isso se deve ao fato dos objetivos de



minimização da distância e maximização do equilíbrio levarem ao aumento do número de pontos de acesso, o que necessariamente afeta na interferência das soluções. Este aspecto justifica mais uma vez a abordagem multiobjetivo adotada, uma vez que esta busca soluções intermediárias aos pontos ótimos de cada função isoladamente.

O tempo gasto para a avaliação do cenário 3 foi um pouco superior aos anteriores, levando 47.5 segundos em média para execução. A tabela a seguir exhibe os dados da análise de robustez do AG.

Tabela 7 - Análise de Robustez - cenário 3

Solução (#AP)	% Cobertura			Desequilíbrio de carga		
	Pior	Média	Melhor	Pior	Média	Melhor
15	96.0	98.4	99.7	1.69	1.59	1.51
16	96.7	98.7	100	1.66	1.54	1.47
17	95.5	98.0	100	1.49	1.41	1.35
17	95.5	98.1	99.7	1.49	1.41	1.35
17	95.5	98.1	100	1.50	1.41	1.34
17	95.5	98.7	99.7	1.48	1.40	1.33
18	96.5	97.8	100	1.42	1.33	1.27
18	95.3	97.7	99.7	1.41	1.33	1.28
18	95.3	97.7	99.7	1.41	1.33	1.28
19	95.0	97.8	99.7	1.35	1.27	1.20
19	95.3	97.7	99.5	1.34	1.27	1.21
19	97.3	98.9	100	1.39	1.29	1.23
20	96.5	98.6	100	1.22	1.17	1.13
20	95.7	98.3	100	1.21	1.16	1.12
20	96.7	98.5	100	1.24	1.18	1.13
20	96.0	98.1	99.7	1.31	1.21	1.15
20	96.0	98.0	99.7	1.32	1.22	1.15
20	96.7	98.5	100	1.23	1.17	1.12
21	95.7	98.3	100	1.21	1.16	1.12
21	95.7	98.4	100	1.23	1.14	1.09
21	96.7	98.6	100	1.29	1.20	1.12
21	96.7	98.7	100	1.29	1.20	1.11
22	96.2	98.4	100	1.20	1.11	1.05
22	96.2	98.4	100	1.22	1.13	1.06
22	96.0	98.4	100	1.21	1.12	1.05
22	97.25	99.0	100	1.19	1.11	1.05

A Tabela 7 indica que, mais uma vez, a variação do perfil de consumo não trouxe perdas significativas para as soluções. Dentre todas as alternativas apresentadas, a solução com pior desempenho em relação à cobertura ainda obteve 95% no pior caso. Já em relação ao equilíbrio, a maior perda foi de cerca de 9% em relação ao caso médio.

### 7.3.5 Cenário 4

A elevada concentração de usuários em apenas dois locais na área de serviço da WLAN do cenário 4 torna o planejamento deste ambiente um desafio. Por um lado, é inevitável que o uso de poucos AP neste ambiente leve a altos níveis de desequilíbrio da rede. Por outro lado, o emprego de mais pontos de acesso na WLAN contribui para o aumento da interferência na WLAN.

O gráfico das soluções obtidas para execução do algoritmo no cenário 4 são exibidas na Figura 28. Para este cenário, o algoritmo encontrou 30 soluções utilizando entre 15 a 22 pontos de acesso.

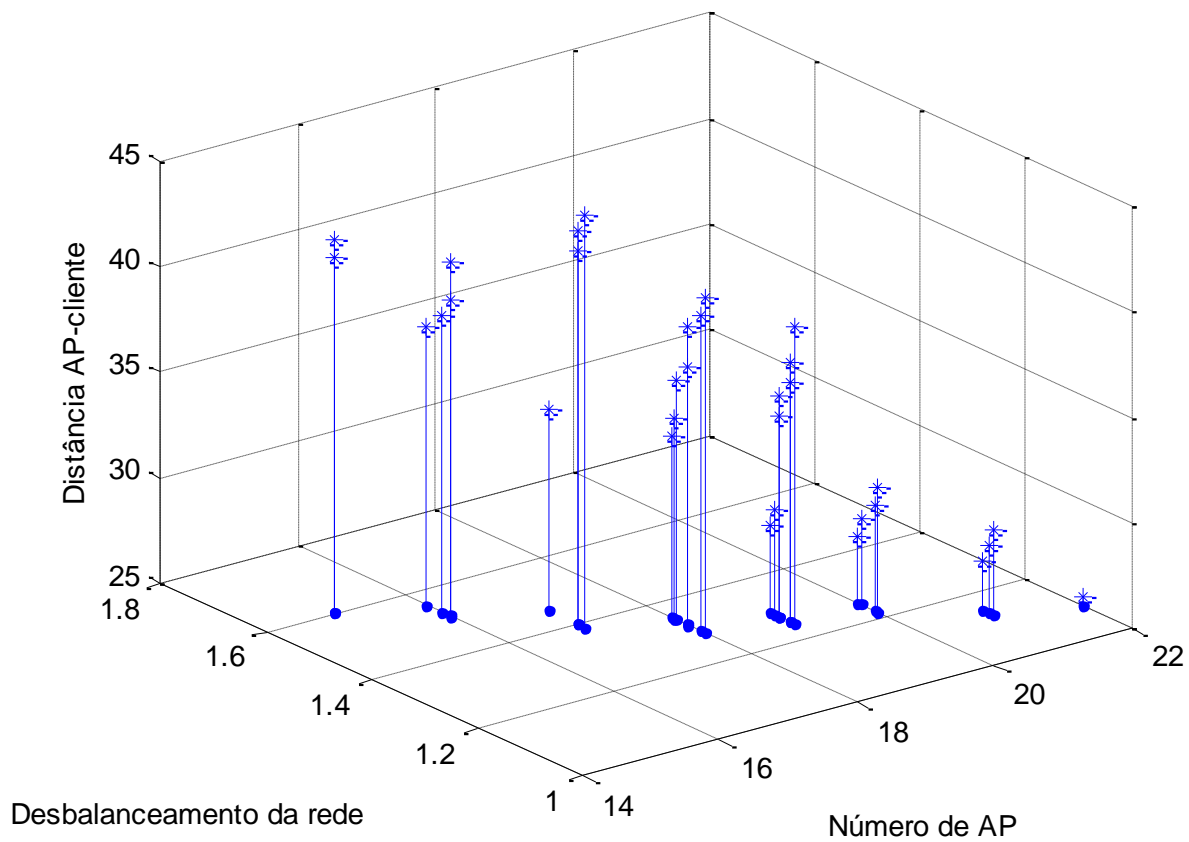


Figura 28 - Soluções obtidas no cenário 4

O perfil observado nessa aproximação é o mesmo dos casos anteriores, onde o aumento da quantidade de pontos de acesso implica melhoras na intensidade de sinal dos clientes e no balanceamento da carga. Também foi reforçado o fato de que o aumento do número de pontos de acesso acarreta em aumentos da interferência (vide Tabela 8).

Tabela 8 - Valores das Funções Objetivo - Cenário 4

Solução (#AP)	Desquilíbrio da rede	Distância AP-cliente	Interferência (% clientes)	
15	1.601	42.7 m	16.5	
<b>15</b>	<b>1.602</b>	<b>41.8 m</b>	<b>14.0</b>	<b>A</b>
16	1.513	40.0 m	15.3	
16	1.511	41.8 m	11.7	
16	1.528	39.1 m	26.3	
16	1.557	38.2 m	30.5	
17	1.455	34.5 m	34.5	
17	1.401	43.6 m	30.5	
<b>17</b>	<b>1.400</b>	<b>42.7 m</b>	<b>25.5</b>	<b>B</b>
17	1.387	44.5 m	35.5	
18	1.320	39.1 m	50.7	
18	1.345	36.4 m	42.5	
18	1.296	40.0 m	42.3	
18	1.346	34.5 m	51.5	
<b>18</b>	<b>1.351</b>	<b>33.6 m</b>	<b>53.0</b>	<b>C</b>
18	1.289	40.9 m	41.5	
19	1.276	35.5 m	45.7	
19	1.295	29.1 m	64.5	
19	1.287	30.0 m	62.7	
19	1.256	37.3 m	44.5	
19	1.257	36.4 m	45.7	
19	1.247	39.1 m	42.5	
20	1.219	30.9 m	68.2	
20	1.253	29.1 m	65.0	
20	1.226	30.0 m	78.0	
<b>20</b>	<b>1.26</b>	<b>28.2 m</b>	<b>67.7</b>	<b>D</b>
21	1.139	28.2 m	72.3	
21	1.153	27.3 m	67.8	
21	1.131	29.1 m	68.5	
22	1.091	25.4 m	82.5	

Mais uma vez, quatro soluções foram escolhidas dentre as oferecidas pelo algoritmo (Figura 29), com 15, 17, 18 e 20 pontos de acesso. Dentre estas alternativas, a solução A apresentou menor nível de interferência, com 14%. As soluções B, C e D apresentaram níveis de interferência de 25.5%, 53% e 67.7%, respectivamente. Apesar do elevado nível de interferência, inevitável neste tipo de ambiente, é necessário ter em mente que, quando comparada ao esquema automático de atribuição de canais, a interferência proporcionada pelo mecanismo de atribuição proposto é significativamente menor.

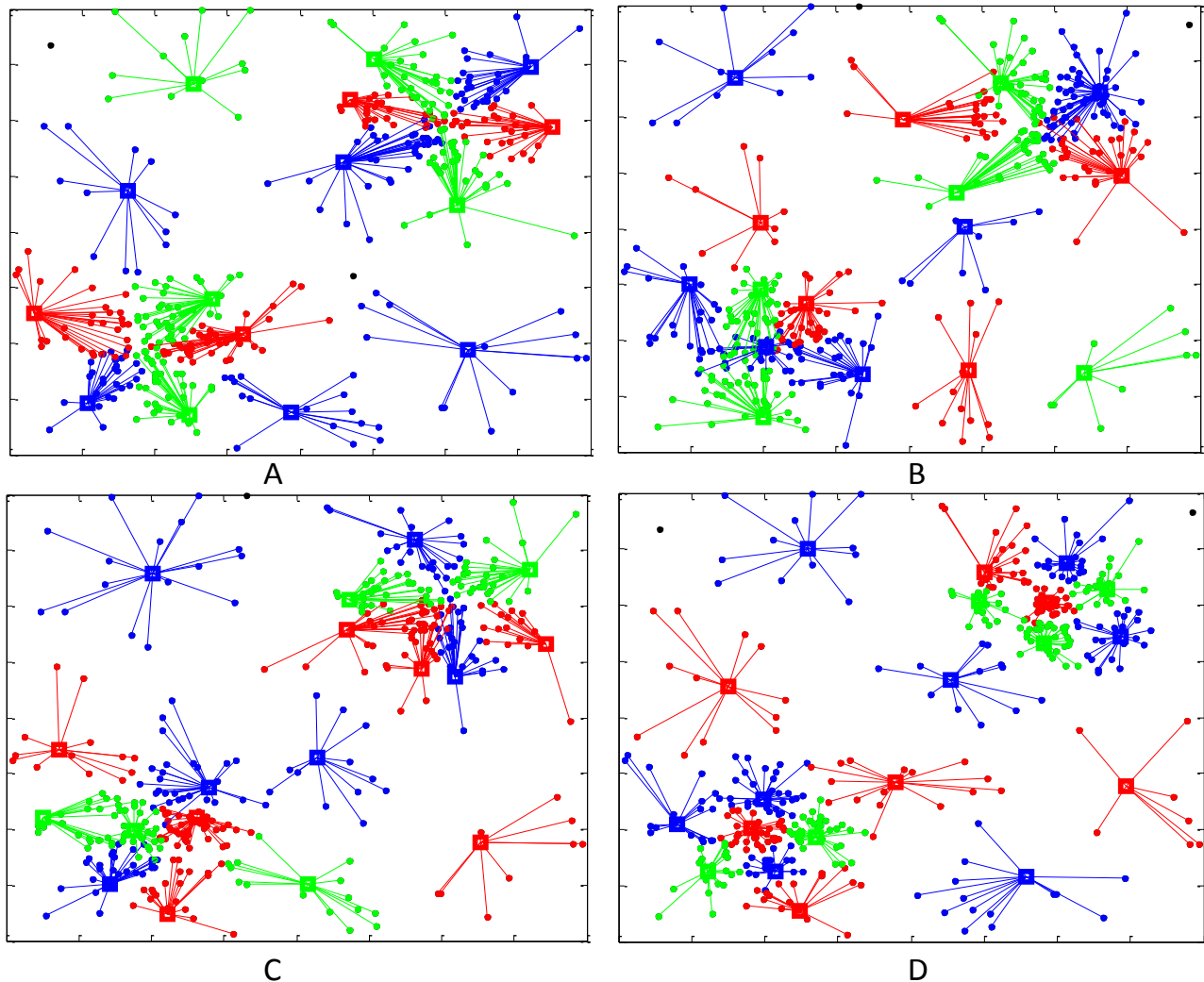


Figura 29 - Alternativas de Projeto - cenário 4

Ainda quanto às alternativas A, B, C e D da Figura 29, é possível perceber que, apesar da complexidade do ambiente, o AGMO propôs soluções interessantes no que diz respeito ao equilíbrio de carga da rede e cobertura da rede. Devido ao planejamento deste ambiente ser mais complexo que os outros abordados anteriormente, o tempo necessário para a avaliação do cenário 4 foi ligeiramente maior, gastando em média, 59.3 segundos.

A análise de robustez realizada para este último cenário é exibida na Tabela 9. Este estudo contribui de forma significativa para a escolha da solução que melhor atende às necessidades do ambiente.

Tabela 9 – Análise de Robustez - cenário 4

Solução (#AP)	% Cobertura			Desequilíbrio de carga		
	Pior	Média	Melhor	Pior	Média	Melhor
15	96.0	98.4	100	1.85	1.69	1.58
15	96.2	98.3	100	1.92	1.70	1.60
16	95.5	98.2	100	1.70	1.58	1.49
16	96.0	98.2	100	1.73	1.59	1.50
16	96.5	98.6	100	1.72	1.58	1.49
16	96.7	98.7	100	1.77	1.63	1.52
17	96.5	98.3	99.7	1.64	1.52	1.43
17	96.0	98.2	100	1.57	1.45	1.37
17	95.5	98.0	100	1.56	1.44	1.36
17	95.7	98.1	99.7	1.53	1.43	1.36
18	96.5	98.6	100	1.47	1.39	1.31
18	97.0	99.1	100	1.54	1.41	1.34
18	96.7	98.5	99.7	1.49	1.37	1.30
18	96.7	98.5	99.7	1.48	1.39	1.33
18	96.7	98.5	99.7	1.50	1.41	1.33
18	96.5	98.6	99.7	1.49	1.37	1.29
19	96.2	98.4	100	1.43	1.32	1.26
19	97.0	98.8	100	1.43	1.34	1.26
19	96.7	98.9	100	1.44	1.34	1.26
19	96.5	98.7	100	1.39	1.30	1.23
19	96.5	98.5	100	1.41	1.31	1.24
19	97.0	98.8	100	1.42	1.31	1.24
20	96.7	98.8	100	1.37	1.28	1.20
20	97.2	99.0	100	1.36	1.29	1.21
20	96.2	98.5	100	1.36	1.28	1.20
20	97.2	99.1	100	1.37	1.29	1.21
21	96.2	98.7	100	1.27	1.20	1.13
21	96.0	98.5	100	1.31	1.22	1.14
21	96.5	98.7	100	1.27	1.20	1.13
22	96.5	98.7	100	1.23	1.14	1.07

Ao analisar os resultados provenientes do estudo de robustez, é possível notar que mais uma vez não houve perda significativa nem na cobertura nem no desequilíbrio: a menor cobertura observada foi de 95% e a maior queda de equilíbrio registrada foi de 10% em relação à média.

### 7.3.6 Teste comparativo

Para mensurar a eficiência da ferramenta de planejamento proposta, foram realizados testes comparando o AGMO desenvolvido com o algoritmo de clusterização K-means. O K-means utiliza um método de agrupamento partitivo que busca encontrar a melhor divisão de P pontos em uma quantidade K de grupos, determinada a priori. Esse algoritmo utiliza o conceito de centróides, na qual um centróide representa o centro de um grupo. Assim, esse algoritmo de agrupamento irá definir k centróides, um para cada cluster. O objetivo do K-means é minimizar a distância total entre os pontos de um grupo e o seu respectivo centróide, para todos os grupos.

O K-means é bastante popular devido à simplicidade de implementação e sua ordem de complexidade  $O(n)$ , onde n é o número de clusters [32]. A Figura 30 apresenta um exemplo real de execução do algoritmo K-means para agrupamento de dados realizado para cinco partições (B) aplicadas sobre os dados de entrada (A).

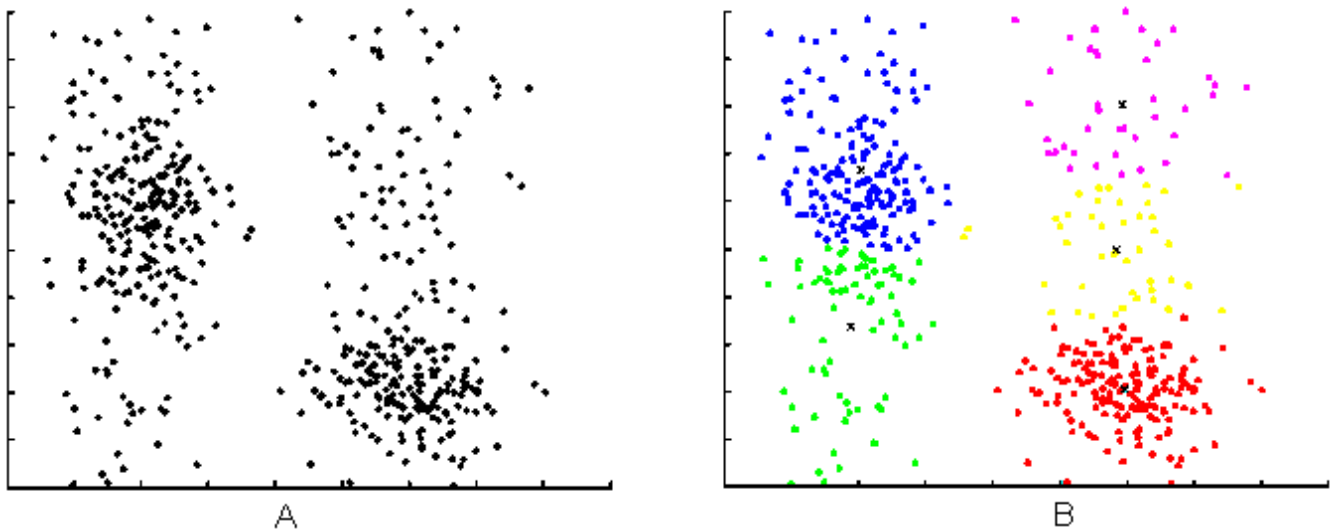


Figura 30 - Exemplo de execução do K-means

Como o centróide de cada cluster representa a distância mínima entre os pontos de um grupo e

um ponto no espaço, seria interessante utilizar as coordenadas (x,y) desses centróides, definidos pelo K-means, como locais para instalação dos pontos de acesso da rede. Assim, a ideia principal deste teste é fornecer uma base de comparação para o algoritmo genético desenvolvido, já que o K-means poderia representar um projetista ad hoc de rede experiente. Para realizar uma comparação justa, as mesmas técnicas de balanceamento de carga e atribuição de canais utilizadas neste trabalho serão empregados juntamente com as soluções fornecidas pelo K-means.

### ***7.3.6.1 Resultados do teste comparativo***

Para validar os resultados obtidos por ambos os algoritmos, os dois métodos foram executados para o caso do problema bi-objetivo (reduzir o número de AP e o desbalanceamento da rede), nos quatro diferentes cenários propostos. Isto se deve ao fato de um gráfico bidimensional facilitar a visualização e comparação dos resultados obtidos. Nesse caso, as soluções ineficazes obtidas tanto pelo K-means, quanto para o NSGA-II são descartadas. Consideram-se como ineficazes as soluções que não são capazes de atender aos requisitos de cobertura do ambiente, ou soluções que empreguem uma configuração de rede de tal modo que a capacidade máxima de banda de um AP seja excedida.

Junto com o teste comparativo, foi realizada também uma análise de repetibilidade dos resultados encontrados pelo NSGA-II, para cada um dos cenários considerados. Nesse estudo, o algoritmo foi executado cinco vezes e as aproximações da fronteira Pareto encontradas foram comparadas com os resultados obtidos pelo K-means. A interferência gerada na rede também foi mensurada, utilizando os mesmos critérios de cálculo de interferência empregados nos testes anteriores.

Na Figura 31 são apresentadas as aproximações da fronteira Pareto obtidas durante cinco execuções para o NSGA-II e os resultados do algoritmo K-means no cenário 1. Para essas instâncias, o NSGA-II encontrou soluções factíveis variando de 13 a 22 pontos de acesso. Já o K-means encontrou soluções empregando entre 14 a 22 pontos de acesso. Quanto à repetibilidade dos resultados obtidos pelo NSGA-II, é possível notar que as cinco fronteiras encontradas estão praticamente sobrepostas, o que mostra que o algoritmo foi extremamente robusto para este cenário. É possível notar também na Figura 31 que embora os resultados estejam muito próximos, todas as execuções do NSGA-II apresentaram resultados melhores que o K-means.

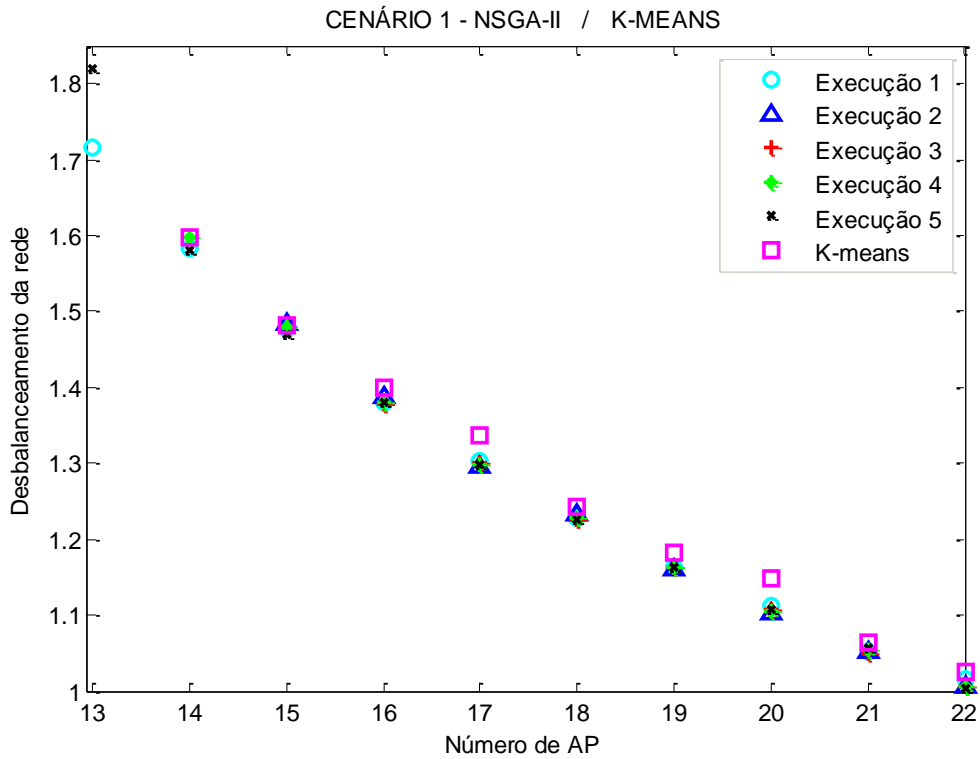


Figura 31 - Teste comparativo - cenário 1

A Tabela 10 exibe os valores do desbalanceamento da rede e interferência da rede o NSGA-II e para o K-means. Os resultados obtidos pelo NSGA-II referem-se a uma execução típica do algoritmo.

Tabela 10 - Comparativo NSGA-II / K-means - cenário 1

Solução (#AP)	NSGA-II		K-means	
	Desquilíbrio de carga	Interferência (% clientes)	Desquilíbrio de carga	Interferência (% clientes)
13	1.71	19.5	-	-
14	1.57	19.0	1.60	0.5
15	1.47	8.5	1.48	5.0
16	1.38	9.0	1.40	15.3
17	1.30	5.3	1.34	14.5
18	1.23	3.2	1.24	7.2
19	1.16	24.0	1.18	16.8
20	1.11	10.2	1.15	23.3
21	1.05	1.5	1.06	22.3
22	1.01	10.7	1.03	24.0



Os resultados das cinco execuções do AGMO proposto e do K-means para o cenário 2 são apresentadas na Figura 32. Pode-se notar que para todas as execuções do NSGA-II, os resultados encontrados foram melhores que os resultados do K-means. Além disso, as soluções obtidas pelo NSGA-II para este cenário também apresentam grande similaridade, o que indica robustez do AG. Por fim, o K-means não obteve soluções factíveis empregando menos de 15 pontos de acesso.

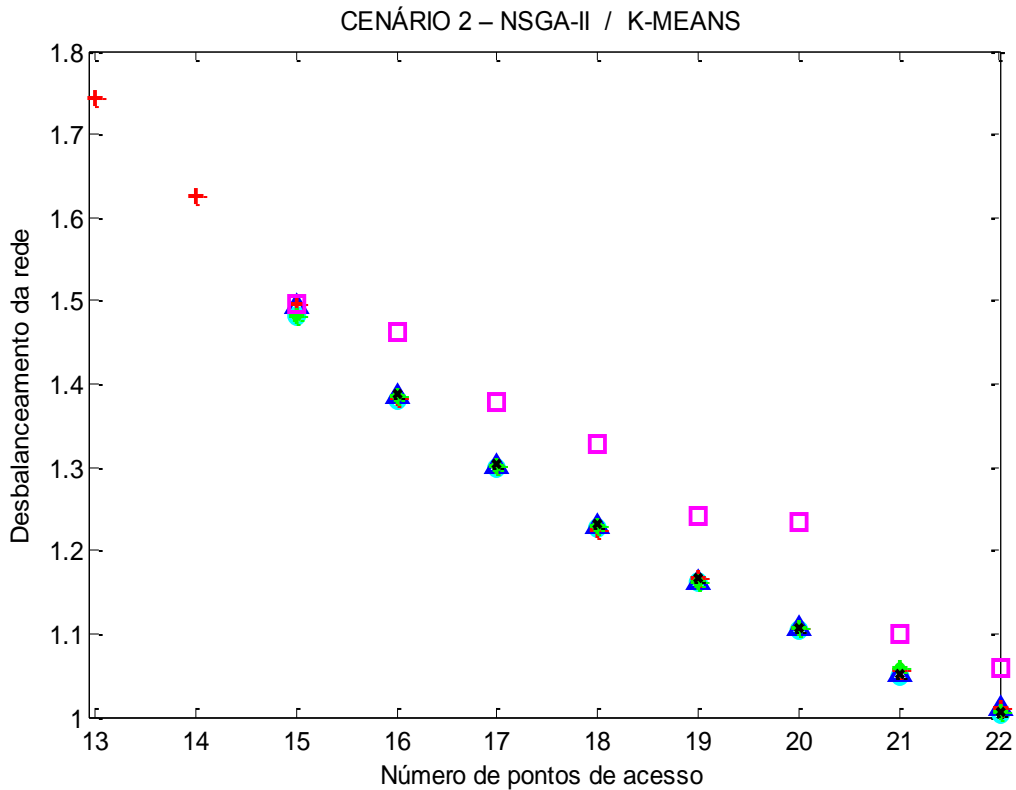


Figura 32 - Teste comparativo - cenário 2

A

Tabela 11 exhibe os resultados dos dois algoritmos implementados. Empregando um mesmo número de pontos de acesso, o NSGA-II apresentou um rendimento melhor que o K-means com relação ao equilíbrio de carga da WLAN. No entanto, analisando esses dados não é possível afirmar qual dos dois algoritmos oferece soluções na qual as configurações dos concentradores da rede impingem menor interferência na WLAN, já que o percentual de interferência nos clientes, para este cenário, variou bastante.

Tabela 11 - Comparativo NSGA-II / K-means - cenário 2

Solução (#AP)	NSGA-II		K-means	
	Desquilíbrio de carga	Interferência (% clientes)	Desquilíbrio de carga	Interferência (% clientes)
13	1.75	2.7	-	-
14	1.63	10.7	-	-
15	1.48	3.0	1.50	3.2
16	1.39	5.2	1.42	0.75
17	1.29	13.0	1.34	3.5
18	1.23	1.25	1.30	8.75
19	1.16	8.0	1.19	0.5
20	1.11	14.5	1.18	14.7
21	1.05	20.2	1.14	12.5
22	1.01	26.5	1.06	25.0

Na Figura 33 são exibidas as aproximações da fronteira Pareto dos dois algoritmos. Assim como nos casos anteriores, o estudo de repetibilidade realizado para o NSGA-II no cenário3 sugere que o algoritmo proposto é robusto, uma vez que as cinco execuções obtiveram fronteiras semelhantes. Quando comparados os resultados do algoritmo genético com o K-means, é possível perceber que o algoritmo de agrupamento K-means não foi capaz de encontrar soluções factíveis com as mesmas configurações do NSGA-II. Além disso, devido à alta concentração de clientes em determinadas áreas desse ambiente, os resultados do K-means foram piores que o algoritmo genético multiobjetivo implementado.

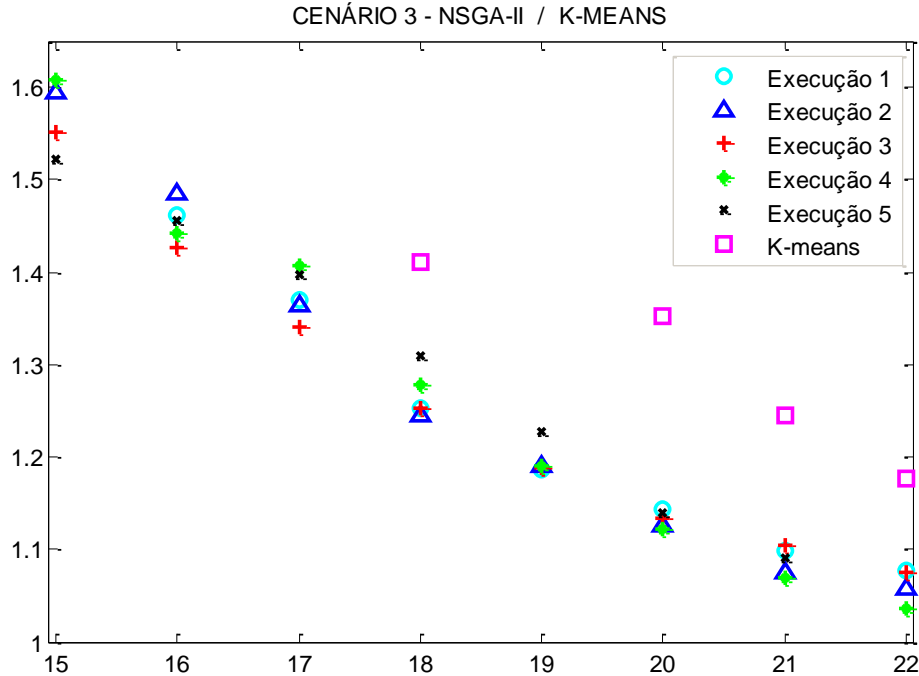


Figura 33- Teste comparativo - cenário 3

Tabela 12- Comparativo NSGA-II / K-means - cenário 3

Solução (#AP)	NSGA-II		K-means	
	Desquilíbrio de carga	Interferência (% clientes)	Desquilíbrio de carga	Interferência (% clientes)
15	1.56	21.2	-	-
16	1.45	27.7	-	-
17	1.36	28.5	-	-
18	1.27	34.2	1.42	26.3
19	1.19	37.0	-	-
20	1.14	44.7	1.35	47.8
21	1.12	30.2	1.25	34.0
22	1.04	51.0	1.18	57.3

Por fim, devido à sua complexidade, no teste de repetibilidade, o cenário 4 foi o que apresentou maior desvio dentre as fronteiras obtidas (Figura 34). No entanto, é possível perceber que a diferença entre as fronteiras é acentuada principalmente nos extremos, o que sugere que o algoritmo continua sendo robusto para as soluções intermediárias, que geralmente são as mais relevantes do ponto de vista prático. Assim como no cenário 3, todas as soluções obtidas pelo NSGA-II obtiveram resultados

melhores que o algoritmo de agrupamento K-means para o quarto cenário. Esses testes comprovaram a eficiência do algoritmo desenvolvido em ambientes de WLAN difíceis de serem planejados.

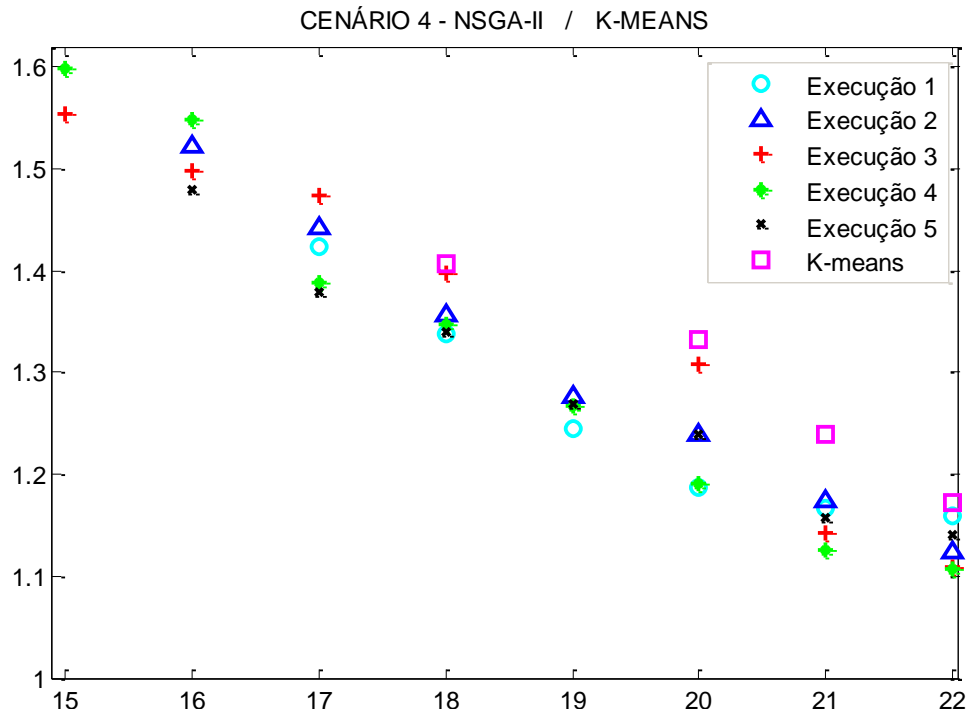


Figura 34- Teste comparativo - cenário 4

Para o cenário 4, as soluções obtidas pelo K-means geraram maior interferência na rede (vide Tabela 13). Este problema se deve ao fato do K-means concentrar os centróides muito próximos uns dos outros em cenários com essas características.

Tabela 13 - Comparativo NSGA-II / K-means - cenário 4

Solução (#AP)	NSGA-II		K-means	
	Desquilíbrio de carga	Interferência (% clientes)	Desquilíbrio de carga	Interferência (% clientes)
15	1.62	31.4	-	-
16	1.49	33.7	-	-
17	1.36	35.5	-	-
18	1.29	33.5	1.41	58.2
19	1.23	39.5	-	-
20	1.19	53.7	1.33	65.0
21	1.13	53.3	1.24	65.7
22	1.12	55.7	1.18	74.5

## 8 Considerações Finais

Nos últimos anos, grandes projetos de WLAN têm sido implantados em universidades, *shoppings centers*, centro de convenções e até mesmo cidades inteiras. A popularização desta tecnologia trouxe consigo um aumento no desempenho e na cobertura da rede, além de possibilitar o desenvolvimento de novas aplicações. No entanto, a adoção em massa das redes locais sem fio resultou em cenários de WLAN com elevada densidade de usuários em determinados pontos, gerando problemas de desequilíbrio e interferência na rede, reduzindo seu desempenho. Fatores como estes tornam o planejamento de redes IEEE 802.11 um tópico atrativo para pesquisadores e empresas.

Nessa dissertação, foi desenvolvido uma ferramenta de planejamento de WLAN que é capaz de definir a quantidade e o posicionamento de pontos de acesso no espaço, associar cliente e AP, e sugerir um esquema de alocação de canais em redes WLAN. Essa ferramenta é baseada em algoritmos genéticos multiobjetivo e heurísticas gulosas responsáveis por realizar o balanceamento de carga e atribuição de canais. Essa ferramenta é capaz de melhorar a qualidade de serviço entregue ao usuário e o desempenho global dessa rede.

A maior vantagem da utilização de meta-heurísticas nesse tipo de problema é a redução do tempo computacional requerido para se obter boas soluções em espaços de dimensões elevadas. O AG proposto, associado às heurísticas gulosas, embarca no processo de otimização conhecimento específico sobre o problema tratado, o que aumenta sua eficiência.

O algoritmo proposto foi avaliado em quatro cenários de projeto relevantes, nos quais foram levadas em conta necessidades diferentes para os usuários da rede local sem fios. As soluções obtidas pela ferramenta de projeto proposta foram analisadas com respeito à eventual mobilidade e alteração do perfil de demanda dos usuários. Essa análise, realizada por meio de simulações de Monte Carlo, obteve resultados muito promissores, indicando que as WLAN encontradas são capazes de lidar com diferentes perfis de uso.

Entende-se que o objetivo do trabalho foi atingido, uma vez que a ferramenta proposta foi capaz de gerar soluções que resultaram em WLAN eficientes e econômicas. Por fim, foi possível obter a ocupação máxima dos recursos da rede e uma distribuição justa desses recursos dentre os usuários.

## 8.1 Trabalhos futuros

Vários prosseguimentos podem ser dados ao trabalho desenvolvido nesta dissertação. Dentre essas possíveis extensões, podem-se citar:

- Avaliar outros cenários de WLAN *indoor*: já que a maioria dos projetos de WLAN estão sendo implementados em ambientes internos, a presença de obstáculos, como paredes, deve ser considerada na fase de planejamento pelo algoritmo. Para isso, um novo modelo de propagação de sinal e perdas já se encontra em estudo.

- Estender a ferramenta para planejamento 3D: muitos dos cenários atuais de planejamento de uma WLAN ESS envolvem a instalação em ambientes com múltiplos pisos. Pretende-se estender o algoritmo para lidar com este tipo de ambiente. Nesse caso, deve ser levado em conta não só o piso em que o AP será instalado, mas também a interferência causada pelos AP nos pisos adjacentes, tendo em conta a atenuação de sinal provocada pelo teto.

- Considerar, no planejamento da rede sem fio, restrições que impeçam a instalação dos AP em determinados locais: nem sempre qualquer coordenada  $(x,y)$  é válida para posicionar os Access Points. Nestes casos se faz necessário restringir as áreas candidatas para instalação.

- Implementar mecanismos de sobrevivência: as redes WLAN estão sujeitas a eventuais falhas dos AP. Tem-se por objetivo desenvolver mecanismos de reconfiguração dos pontos de acesso ativos, com o intuito de atenuar o impacto causado por falhas. Esses mecanismos devem atuar no esquema de associação dos clientes e na realocação dos canais dos pontos de acesso em operação.

- Adaptar o algoritmo para lidar com novos protocolos e planejamento híbrido: como o padrão de WLAN IEEE 802.11n oferece maior largura de banda e alcance aos usuários da rede, a tendência é que o padrão N se popularize e que novos projetos de rede local sem fios empreguem esta tecnologia. Pretende-se adaptar o algoritmo para planejar redes híbridas, capazes de atender clientes tanto com o protocolo G quanto com o protocolo N. Nessa situação, deve-se ter em conta que, quando um equipamento G se conecta a uma rede N, ele limita toda a rede N a uma largura de banda de 54Mbps, o que não é desejável. Tendo em vista que a maior parte dos equipamentos em uso ainda utiliza o padrão G, é importante que o algoritmo defina políticas de associação tais que se evite a mistura de clientes G e N, com o intuito de oferecer a melhor qualidade de serviço possível para ambos os tipos de redes.

- Desenvolver um esquema de alocação de frequências que permita o emprego de canais interferentes entre si. Para isto, os impactos de tal atribuição devem ser investigados para mensurar os

problemas causados pela sobreposição espectral desses canais e os ganhos obtidos na WLAN. Espera-se que em ambientes saturados de pontos de acesso, a interferência co-canal gerada seja compensada pelo aumento da quantidade de canais disponíveis para atribuição, reduzindo assim o percentual de clientes que sofram da interferência na rede.

- Implementar um algoritmo evolucionário para realizar a adequada atribuição de canais, tendo como solução inicial, a heurística gulosa desenvolvida nessa dissertação.

- Planejar a rede WLAN tendo em conta variações esperadas no perfil de consumo ao longo do dia/mês/ano: em muitos locais, existe uma migração e variação do perfil dos usuários esperada ao longo de um determinado tempo. Por exemplo, em universidades, o consumo de recursos tende a variar da manhã para a hora do almoço, para a tarde e para a noite. No entanto, o consumo em cada uma dessas janelas de tempo pode ser estimado, com base em dados medidos. O algoritmo proposto deve ser trabalhado de forma a ser capaz de lidar simultaneamente com múltiplos perfis de consumo, variando ao longo do dia. Essa extensão deve garantir ao algoritmo maior capacidade de obter soluções robustas, e adequadas ao uso dos funcionários independentemente do instante de tempo considerado.

- Estender a análise de robustez para avaliação do desempenho da rede em longo prazo: o planejamento ótimo para uma rede WLAN atual pode não mais ser eficiente ou até suficiente após 2 ou 3 anos de operação. Propõe-se estender a análise de robustez realizada neste trabalho com o intuito de não só analisar a robustez atual da solução, mas também sua capacidade de lidar com variações plausíveis para o sistema ao longo do tempo.

- Utilizar alguma plataforma de simulação de rede (NS2 ou NetSim, por exemplo) para validação dos mecanismos desenvolvidos para os cenários propostos. Já que alguns simuladores suportam a tecnologia IEEE 802.11, é possível mensurar a real vazão dos pontos de acessos, levando em consideração a interferência gerada e a aglomeração de clientes na rede.

# Referências Bibliográficas

- [1] 802.11f. (2003), Recommended practice for multi-vender access point interoperability via an Inter-Access Point Protocol across distribution systems supporting IEEE 802.11 operation. Technical report, IEEE Std. 802.11f.
- [2] Adickes M. D., Billo R. E., Norman B. A., Banerjee S., Rajgopal J. (1999), Optimization of indoor wireless communication network layouts. Technical Report, 99-5, Dept.of Industrial Engineering, University of Pittsburgh.
- [3] Araujo, J. P., Rodrigues, J. C., Fraiha, S. G., Gervasio, H. G. (2008), A WLAN Planning Proposal through Computational Intelligence and Genetic Algorithms Hybrid Approach. Mobility Conference 2008: 40.
- [4] Arroyo, J. E. C., (2002), Heurísticas e metaheurísticas para otimização combinatória multiobjetivo. Tese de Doutorado em Engenharia Elétrica, UNICAMP.
- [5] Balachandran, A., Voelker, G. M., Bahl, P. and Rangan, P. V. (2002), Characterizing user behavior and network performance in a public wireless LAN, presented at ACM SIGMETRICS'02.
- [6] Balazinska M., Castro P. (2003), Characterizing mobility and network usage in a corporate wireless local-area network," presented at MobiSys'03. San Francisco, USA.
- [7] Bejerano, Y., Han, S. J. (2006), Cell Breathing Techniques for Balancing the Access Point Load in Wireless LANs. Bell Laboratories, Lucent Technologies.
- [8] Carrano, E. G. (2007), Algoritmos Evolucionários Eficientes para Otimização de Redes. Tese de Doutorado, Dep. Eng. Elétrica, UFMG.
- [9] Chen, D., Kintala, C., Garg, S., Trivedi, K. S. (2003), Dependability enhancement for IEEE 802.11 wireless LAN with redundancy techniques. Proceedings of the International Conference on Dependable Systems and Networks, pages 521-528.
- [10] Coello, C. A. C., Lamont, G. B., Veldhuizen, D. A. V. (2007), Evolutionary Algorithms for Solving Multi-Objective Problems (Genetic and Evolutionary Computation), Second Edition. Springer.
- [11] Coello, C. A. C. (2006), Evolutionary Multi\_Objective Optimization: A Historical View fo the field. IEEE Computational Intelligence Magazine , 28-36.
- [12] Deb, K. (2001), Multi-Objective Optimization Using Evolutionary Algorithms. New York: Wiley.
- [13] Deb, K., Agrawal, R.B. (1995), Simulated binary crossover for continuous search space, Complex System 9 115-148.
- [14] Deb, K. e Goyal, M. (1996), A combined genetic adaptive search (GeneAS) for engineering design. Computer Science and Informatics, 26(4), p. 34-45.



- [15] Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S., Meyarivan, T. (2002), A Fast and Elitist Multiobjective Genetic Algorithm: NSGA-II, *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 6(2), pp. 181-197.
- [16] Dias, A., Vasconcelos, J. (2002), Multiobjective Genetic Algorithms Applied to Solve Optimization Problems. *IEEE Transactions on Magnetcs*, Vol. 38, NO. 2 , pp. 1133-1136.
- [17] Drieberg, M. (2010), Channel Assignment Strategies for Throughput Enhancement in High Density Wireless Local Area Networks. PhD thesis, Victoria University (VU), Australia.
- [18] Engelstad, P. E., Osterbo, O. N. (2005), Analysis of QoS in WLAN, *TELEKTRONIKK*, VOL. 1
- [19] Eshelman, L. J.; Schaffer, J. D. (1993), Real-coded genetic algorithms and interval-schemata. In: *Foundations of Genetic Algorithms 2 (FOGA-2)*, San Mateo, CA, p. 187-202.
- [20] Fonseca, C., Fleming, P. (1993), Genetic Algorithms for Multiobjective Optimization: Formulation, Discussion and Generalization. *Proceedings of the Fifth International Conference on Genetic Algorithms* (pp. 416-423). San Mateo, California: Morgan Kauffman Publishers.
- [21] Fontolan, L. F. (2010), Política de QoS para redes IEEE 802.11 com seleção de taxa de serviço baseada em índice de justiça. Dissertação de mestrado, Dep. Engenharia Elétrica, PUC Campinas.
- [22] Forrest, S. (1996), Genetic Algorithms. *Computing Surveys* Vol. 28:1, pp. 77-80.
- [23] Frühwirth, T., Brisset, P. (2000), Placing Base Stations in Wireless Indoor Communication Networks. *IEEE Intelligent Systems*, Vol. 15, pp. 49 - 53, 2000.
- [24] Garcia, E., Vidal, R., Paradells, J. (2005), New Algorithm for Frequency Assignments in IEEE 802.11 Wireless Networks. In *11th European Wireless Conference*, vol.1, pp. 211-217.
- [25] Gast, Matthew (2005), *802.11 Wireless Networks: The Definitive Guide*, Second Edition. O'Reilly.
- [26] Geier, Jim T. (2010), *Designing and Deploying 802.11 Wireless Networks*. Prentice Hall.
- [27] Gomes, F. E. (2006), Mecanismo de Otimização para Sobrevivência em WLAN: Estudo de caso em Rede IEEE 802.11. Tese de Doutorado, Dep. Eng. Elétrica, UnB.
- [28] Goldberg, D. (1989), *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*. Addison-Wesley Publishing Company, INC.
- [29] Gondran, A., Baala, O., Caminada, A., Mabed, H. (2007), Joint optimization of access point placement and frequency assignment in WLAN. *ICI. 3rd IEEE/IFIP International Conference in Central Asia*, pp. 1-5.
- [30] Guimarães, F. G., Ramalho, M. C. (2001), Implementação de um Algoritmo Genético. Relatório Técnico - disciplina otimização, PPGEE/UFMG. Acesso em Maio de 2011.
- [31] Horn, J., Nafpliotis, N., & Goldberg, D. (1994), A Niche Pareto Genetic Algorithm for Multiobjective Optimization. *Proceedings of the First IEEE Conference on Evolutionary Computation* (pp. 82-87). New Jersey: IEEE Service Center.
- [32] Jain, A. K., Murty, M. N., & Flynn, P. J. (1999), Data clustering: a review. *ACM Comput. Surv.*, 31(3):264-323.

- [33] Knowles, J., & Corne, D. (1999), The Pareto Archived Evolution Strategy: A New Baseline Algorithm for Multiobjective Optimisation. *Congress on Evolutionary Computation*, 98-105.
- [34] Kouhbor, S., Ugon, J., Mammadov, M., Rubinov, A., Kruger, A. (2006), Coverage in WLAN: Optimization Model and Algorithm, in *Proc. of the first IEEE International Conference on Wireless Broadband and Ultra Wideband Communications*.
- [35] Lee, J. H., Han, B. J.; Lim, H. J., Kim, Y. D., Saxena, N., Chung, T. M. (2009), "Optimizing Access Point Allocation Using Genetic Algorithmic Approach for Smart Home Environments". *Comput. J.* 52(8): 938-949.
- [36] Leung, K. and Kim, B.-J. (2003), Frequency assignment for IEEE 802.11 wireless networks. In *IEEE Vehicular Technology Conference*.
- [37] Linden, Ricardo. (2006), *Algoritmos Genéticos*, 2 ed. Brasport.
- [38] Mahonen, P., Riihijarvi, J., Petrova, M. (2005), Frequency allocation for WLANs using graph colouring techniques. *Proc. WONS'05, St. Moritz, Switzerland*.
- [39] Man, K. F., Tang, K. S., Kwong, S. (1996), Genetic Algorithms: Concepts and Applications. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol.43 no.5, pp.519-534.
- [40] Maksuriwong, K., Varavithya V., Chaiyaratana, N. (2003), Wireless LAN Access Point Placement using Multi-Objective Genetic Algorithm. *Proceedings of IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*.
- [41] Martins, F. V. C. (2009), Heurísticas Mono e Multiobjetivo para o problema de cobertura e conectividade de redes de Senrores sem Fio planas. *Dissertação de mestrado, Dep. de Engenharia Elétrica, UFMG*.
- [42] Martins, F. V. C., Carrano, E. G., Wanner, E. F., Takahashi, R. H. C. (2010), An Evolutionary Dynamic Approach for Designing Wireless Sensor Networks for Real Time Monitoring. *Proc. IEEE / ACM International Symposium on Distributed Simulation and Real Time Applications*.
- [43] Mateus, G. R., Loureiro, A. A., Rodrigues, R. C. (2001), Optimal network design for wireless local area network. *An. Oper. Res.*, 106(1-4):331-345.
- [44] Matlab R2010a. *Getting Started Guide* (2010). The MathWorks. Acesso em Agosto de 2010. Disponível em <http://www.mathworks.com>.
- [45] Medeiros, F. L. L. (2002), Algoritmo genético híbrido como um método de busca de estados estacionários de sistemas dinâmicos. *Dissertação de mestrado em Computação Aplicada, INPE*.
- [46] Michalewicz, Z.; Janikow, C. Z. (1991), Handling constraints in genetic algorithms. In: *Proceedings of the Fourth International Conference on Genetic Algorithms*, p. 151-157.
- [47] Mishra, A., Banerjee, S., and Arbaugh, W. (2005), Weighted coloring based channel assignment for WLANs. In *Mobile Computing and Communications Review*.
- [48] Nagi, L. and Farkas, L. (2000), Indoor Base Station Location Optimization Using Genetic Algorithms. *IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Communications*, Vol. 2, London, pp. 843-846.

- [49] Olazar, M. R. R. (2007), Algoritmos Evolucionários Multiobjetivo para alinhamento múltiplo de sequências biológicas. Dissertação de mestrado, COPPE/UFRJ.
- [50] Ramine, I., Savage, S. (2005), SyncScan - Practical fast handoff for 802.11 infrastructure network. INFOCOM'05, 1:675-684.
- [51] Rappaport, T. S. (2002), Mobile radio propagation: Large-scale path loss," in Wireless communication: Principles & Practice, 2nd ed, pp. 105-177
- [52] Riihijarvi, J., Petrova, M., Mahonen, P. (2005), Frequency allocation for WLANs using graph colouring techniques. Proc. WONS'05, St. Moritz, Switzerland.
- [53] Rodrigues, R. C., Mateus, G. R., Loureiro, A. A. (1999), "Optimal Base Station Placement and Fixed Channel Assignment Applied to Wireless Local Area Network Projects," IEEE International Conference on Networks(ICON '99), pp.186 - 192.
- [54] Sanches, C. A. (2005), Projetando Redes WLAN. Ed. Erica, São Paulo.
- [55] Schaffer, J. D. (1985). Multiple objective optimization with vector evaluated genetic algorithms. Genetic Algorithms and their Applications: Proceedings of the First International Conference , Lawrence Erlbaum, pp. 93-100.
- [56] Scully, T. and Brown, K. N. (2009), Wireless LAN load balancing with genetic algorithms. In Proceedings of Knowl.-Based Syst. 2009, 529-534.
- [57] Soares, G. L. (1997), Algoritmos genéticos: estudos, novas técnicas e aplicações. Dissertação de mestrado, Dep. Engenharia Elétrica, UFMG.
- [58] Srinivas, M., Patnaik, L. M. (1994), Genetic Algorithms: A Survey. Computer, vol.27, no. 6, pp. 17-26.
- [59] Srinivas, N., Deb, K. (1994), Multiobjective Optimization Using Nondominated Sorting in Genetic Algorithms. Evolutionary Computation, (pp. 221-248).
- [60] Takahashi, R. H. C. (2007), Otimização escalar e vetorial. Notas de Aula.
- [61] Tang, D., Baker, M. (2000), Analysis of a local-area wireless network, presented at the sixth annual Int. Conf. on Mobile Computing and Networking (MobiCom).
- [62] Tanomaru, J. (1995), Motivação, Fundamentos e Aplicações de Algoritmos Genéticos. II Congresso Brasileiro de Redes Neurais. Curitiba.
- [63] Vanhatupa, T., Hännikäinen, M., Hämäläinen, T. D. (2007), Evaluation of throughput estimation models and algorithms for WLAN frequency planning, Elsevier Computer Networks, vol.51, no. 11, pp. 3110-3124.
- [64] Vanhatupa, T., Hännikäinen, M., Hämäläinen, T. D. (2007), Genetic Algorithm to Optimize Node Placement and Configuration for WLAN Planning. Proceedings of 4th international symposium on wireless communication systems, pp 612-616
- [65] Vasconcelos, J. A., Ramírez, J. A., Takahashi, R. H., & Saldanha, R. R. (September de 2001), Improvements in genetic algorithms . IEEE Transactions on Magnetics , pp. 3414 - 3417.

- [66] Villegas, E., Ferr, R.V., Aspas, J.P. (2006), Load balancing in wireless lans using 802.11k mechanisms, IEEE Symposium on Computers and Communications, pp. 844-850.
- [67] Wright, M. H. (1998), Optimization Methods for Base Station Placement in Wireless Applications. IEEE Vehicular Technology Conference, Vol. 1, pp. 387 - 391.
- [68] Zitzler, E., Thiele, L. (1998), An Evolutionary Algorithm for Multiobjective Optimization: The Strength Pareto Approach. Relatório Técnico 43 . Zurich, Switzerland: Computer Engineering and Communication Networks Lab (TIK), Swiss Federal Institute of Technology (ETH).
- [69] Zitzler, E., Laumanns, M., Thiele, L. (2001), SPEA2: Improving the Strength Pareto Evolutionary Algorithm. Relatório Técnico 103 . Zurich, Switzerland: Computer Engineering and Networks Laboratory (TIK), Swiss Federal Institute of Technology (ETH) Zurich, Gloriastrasse 35.