



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
FACULDADE DE ENGENHARIA DA COMPUTAÇÃO
CURSO DE ENGENHARIA DA COMPUTAÇÃO**

OUTROS TRABALHOS EM:
www.projeteredes.com.br

DIEGO DA SILVA NUNES

**GESTÃO DE RECURSOS DE REDES CELULARES 3G
UMTS: UMA ABORDAGEM DO CONTROLE DE POTÊNCIA
DE SISTEMAS UTRA TDD USANDO ANTENAS
INTELIGENTES**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado como requisito parcial
para a obtenção do título de graduado
em Engenharia da Computação pela
Universidade Federal do Pará.

Belém - PA
2009

**GESTÃO DE RECURSOS DE REDES CELULARES 3G UMTS: UMA
ABORDAGEM DO CONTROLE DE POTÊNCIA DE SISTEMAS UTRA TDD
USANDO ANTENAS INTELIGENTES**

Este trabalho foi julgado em ____/____/____ adequado para obtenção do Grau de Engenheiro de Computação, aprovado em sua forma pela banca examinadora que atribuiu o conceito. _____

Prof. Dr. Agostinho Luiz da Silva Castro (Orientador)
Faculdade de Engenharia da Computação
Universidade Federal do Pará

Prof. Dr. Kelvin Dias Lopes (Membro)
Faculdade de Engenharia da Computação
Universidade Federal do Pará

Prof. Dr. Antônio Jorge Gomes Abelém (Membro)
Faculdade de Computação/ ICEN
Universidade Federal do Pará

Prof. Dr. Gervásio Protásio dos Santos Cavalcante
Diretor da Faculdade de Engenharia da Computação
Universidade Federal do Pará

***“O segredo do sucesso é não escutar ninguém.
O segredo do sucesso é ser você do seu jeito
e seguir a sua alma”
Gasparetto***

Agradecimentos

Primeiramente agradeço a Deus por me ajudar de forma indireta nos momentos difíceis.

Agradeço por todos aqueles que contribuíram pelo meu processo de aprendizagem durante todos esses anos.

Agradeço à minha mãe por fazer um grande esforço durante todos esses anos de estudo.

Agradeço também aos meus amigos da UFPA, Andson Balieiro, Peterson Yoshioka, Vitor Makino, além de muitos outros pelos momentos de descontração ao longo desses quatro anos de curso.

Agradeço também ao professor Agostinho Castro, por me orientar na realização deste trabalho.

Resumo

Este trabalho faz uma abordagem a respeito da utilização do algoritmo de controle de potência em sistemas de terceira geração, visando contribuir na redução dos efeitos advindos da interferência. No entanto, pretende-se apresentar neste trabalho uma abordagem para cenários de interferências entre as células de um sistema celular, esta abordagem visa melhorar o baixo ganho obtido quando se trabalha somente no aperfeiçoamento dos algoritmos de gestão da camada rádio.

Como forma de gerenciar melhor os recursos escassos da rede e garantir a qualidade dos serviços prestados ao usuário, deve-se buscar alternativas que possam garantir a confiabilidade na prestação dos serviços e no aumento da capacidade do canal de comunicação, uma das alternativas que incorpora essa idéia e encontra-se bastante viável em um sistema celular são as *Antenas Inteligentes*. Sua característica *beamforming* irá proporcionar grandes benefícios como: minimização dos efeitos do desvanecimento por multipercursos, redução da interferência, aumento da capacidade do sistema, redução do *delay spread*.

Com base nestes benefícios, é feita uma análise conjunta do algoritmo de controle de potência e o emprego de antenas inteligentes para o sistema UTRA-TDD. Utilizando a linguagem de programação Java para a reprodução de cenários em um ambiente de simulação, avaliou-se o desempenho da estratégia conjunta. Os resultados comprovam a aplicabilidade da filtragem espacial proporcionada pelo uso das antenas inteligentes no que concerne a redução da interferência e melhoria da atuação de um algoritmo de controle de potência.

Palavras-chave: Alocação de Recursos, Antenas Inteligentes, Controle de Potência, Filtragem Espacial, Gerenciamento dos Recursos de Radio, UMTS.

Abstract

This work is an approach regarding the use of the algorithm for power control systems in third generation, contributing to the reduction of the effects resulting from interference. However, it is intended to make this work an approach to scenarios of interference between the cells of a cellular system, this approach aims to improve the low gain when working only on improved algorithms for managing the radio layer.

As a way to better manage the scarce resources of the network and ensure the quality of services to the user, you should look for alternatives that can ensure the reliability in service delivery and increasing the capacity of the communication channel, one of the alternatives that incorporates this idea and is quite feasible in a cellular system is the smart antennas. His feature beamforming will provide great benefits such as minimizing the effects of multipath fading reduced interference, increased capacity of the system, reducing the delay spread, etc.

Based on these benefits, there is a joint analysis of the algorithm to power control and smart antennas for UTRA-TDD system, using the Java programming language for the reproduction of scenarios to evaluate the performance that is expected from this approach.

Keywords: Resource Allocation, Smart Antennas, Power Control, Space Filtering, Radio Resource Management, UMTS.

Lista de Ilustrações

Figura 2.1 - Evolução do Sistema UMTS.	19
Figura 2.2 - Modo FDD.	21
Figura 2.3 - Modo TDD.	21
Figura 2.4 - Arquitetura do sistema UMTS.	22
Figura 2.5 - Núcleo da rede com base no Release 99.	24
Figura 2.6 - Modo de operação do FDD e TDD respectivamente.	24
Figura 2.7 - Estrutura do frame no modo UTRA-TDD.	26
Figura 2.8 - Cenário de alocação no slot para DL e UL nas quatro distribuições possíveis.	26
Figura 2.9 - Cenário de interferências possíveis no UTRA-TDD.	27
Figura 2.10 - Localizações dos algoritmos RRM.	29
Figura 2.11 - Típico cenário de uma operação de handover.	31
Figura 2.12 - Cenário de um soft handover.	32
Figura 2.13 - Cenário do efeito Near-Far.	34
Figura 2.14 - Tipos de controle de potência.	34
Figura 2.15 - Cenário dos métodos utilizados pelo algoritmo de controle de potência.	36
Figura 3.1 - Exemplo de transmissão usando antenas inteligentes.	40
Figura 3.2 - Diagrama de Venn mostrando a interdisciplinaridade das antenas inteligentes.	40
Figura 3.3 - Exemplo de funcionamento do comutador de lóbulos.	41
Figura 3.4 - Exemplo de funcionamento do arranjo defasador dinâmico.	42
Figura 3.5 - Exemplo de funcionamento do arranjo adaptativo.	43
Figura 3.6 - Representação de um conjunto arbitrário de antenas.	44
Figura 3.7 - Conjunto Linear com elementos espaçados igualmente por d .	45
Figura 3.8 - Arranjo retangular de antenas com arranjos de elementos.	46
Figura 3.9 - Representação de um conjunto circular de antenas.	48
Figura 3.10 - a) Beamforming analógico b) Beamforming Digital.	48
Figura 3.11 - Receptor rake com filtro espacial.	49
Figura 3.12 - Beamforming no downlink para diferentes tipos de canais.	50
Figura 3.13 - Resultado esperado após o uso do filtro espacial.	51

Figura 3.14 - Cenário do delay spread.	53
Figura 3.15 - Forma tradicional de cobrir uma célula em (a) e forma adaptativa em (b).	53
Figura 3.16 - Diferentes lóbulos atendendo usuários distintos.	54
Figura 4.1 - Cenário de interferência inter-celular com antenas inteligentes na estação base, (a) Uplink puro (b) Downlink puro (c) Uplink com slot cruzado (d) Downlink com slot cruzado.	58
Figura 4.2 - Cenário de interferência inter-celular com antenas inteligentes na estação base, (a) Uplink puro (b) Downlink puro (c) Uplink com slot cruzado (d) Downlink com slot cruzado.	59
Figura 4.3 - Processo de alocação no frame.	62
Figura 5.1 - Custer size com sete células.	63
Figura 5.2 - Estrutura do frame para a célula alvo.	64
Figura 5.3 - Resultado da simulação com antenas omnidirecionais.	65
Figura 5.4 - Resultado da simulação com antenas inteligentes.	65
Figura 5.5 – Resultado da simulação com antenas omnidirecionais.	66
Figura 5.6 – Resultado da simulação com antenas inteligentes.	66
Figura 5.7 - Resultado da simulação com antenas omnidirecionais.	67
Figura 5.8 - Resultado da simulação com antenas inteligentes.	68
Figura 5.9 - Resultado da simulação com antenas omnidirecionais.	69
Figura 5.10 - Resultado da simulação com antenas inteligentes.	69

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 - Comparação ente os modos TDD e FDD.	25
Tabela 4.1 - Tipos de interferências no UTRA-TDD usando antenas omnidirecionais.	57
Tabela 4.2 - Novo cenário de interferência inter-celular com antenas inteligentes na estação base conforme a Figura 4.2.	59
Tabela 5.1 - Perfil de tráfego adotado.	63
Tabela 5.2 - Parâmetros da simulação.	69

Lista de Abreviaturas

2G	Segunda Geração
3G	Terceira Geração
4G	Quarta Geração
3GPP	3rd Generation Partnership Project
AC	Admission Control (Controle de Admissão)
ATM	Asynchronous Transfer Mode
BER	Bit Error Ratio (Taxa de Bits Errados)
CCPCH	Canal Físico de Controle Primário e Secundário
CDMA	Acesso Múltiplo por Divisão de Código
CS	Circuito de Chaveamento
DBF	Digital Beamforming
DCA	Dynamic Channel Allocation (Alocação Dinâmica de Canais)
DL	Downlink
DPCH	Canal Físico Dedicado
DPCCH	Canal Físico Dedicado de Controle
DPDCH	Canal Físico Dedicado de Dados
DS-CDMA	Direct Sequence CDMA
DSP	Digital Signal Processor
ERB	Estação Rádio Base
ETSI	European Telecommunications Standards Institute
FDD	Frequency Division Duplex
FDMA	Acesso Múltiplo por Divisão de Frequência
GGSN	Gateway GPRS Support Node
GMSC	Gateway MSC
HC	Control Handover (Controle de Handover)
HLR	Home Location Register
IP	Internet Protocol
ITU-T	International Telecommunications Union
LC	Control Load (Controle de Carga)
MAC	Medium Access Control

MAI	Interferência de Múltiplo Acesso
MSC	Mobile Services Switching Centre
NPDB	Number Portability DataBase
PC	Power Control (Controle de Potência)
PCs	Computadores Pessoais
PICH	Canal de Indicação de Paging
PRACH	Canal Físico de Acesso Aleatório
PS	Packet Switched; Packet Scheduler
PUDs	Protocol Data Units
QoS	Quality of Service
RLC	Radio Link Control
RNC	Radio Network Controller
RNS	Radio Network Subsystem
RRM	Radio Resource Management
SCH	Canal de Sincronização
SDMA	Acesso Múltiplo por Divisão Espacial
SFIR	Spatial Filtering for Interference Reduction
SGSN	Serving GPRS Support Node
SINR	Relação Sinal-Interferência e Ruído
SP	Switching Point
TDD	Time Division Duplex
TDMA	Acesso Múltiplo por Divisão do Tempo
TPC	Comando de Controle na Transmissão
UE	Equipamento do Usuário
UL	Uplink
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
USIM	UMTS Subscriber Identity Module
UTRA-TDD	Universal Terrestrial Radio Access Time Division Duplex
UTRAN	UMTS Terrestrial Radio Access Network
VLR	Visitor Location Register
VOIP	Voice over IP
WCDMA	Wideband Code Division Multiple Access

Sumário

1. Introdução	14
1.1 Motivação e Definição do Problema	15
1.2 Contribuição	20
1.3 Organização	22
2. Sistema UMTS	27
2.1 Introdução	28
2.2 Arquitetura do Sistema UMTS	29
2.3 Canal Físico e Estrutura do Frame no UTRA-TDD	29
2.4 Cenários de Interferências no UTRA-TDD	30
2.4.1 Interferência de Terminal Móvel para Terminal Móvel	30
2.4.2 Interferência de Estação Base para Estação Base	30
2.5 Algoritmos RRM	32
2.5.1 Controle de Carga	33
2.5.2 Handover	36
2.5.3 Escalonador de Pacotes	38
2.5.4 Controle de Admissão	39
2.5.5 Alocação Dinâmica de Canais	40
2.5.6 Controle de Potência	42
2.5.6.1 Open Loop Power Control	44
2.5.6.2 Closed Loop Power Control	36
2.5.3.3 Inner Loop Power Control	36
2.5.3.4 Outer Loop Power Control	38
3. Antenas Inteligentes	39
3.1 Introdução	39
3.2 Níveis de Inteligência	41
3.2.1 Comutador de Lóbulos	41
3.2.2 Conjunto Defasador Dinâmico	41
3.2.3 Conjunto Adaptativo	42
3.3 Arranjo de Antenas	43
3.3.1 Fator de Conjunto	43

3.3.2 Arranjo Linear de Antenas	45
3.3.3 Arranjo Retangular de Antenas	46
3.3.4 Arranjo Circular de Antenas	47
3.4 Beamforming	48
3.4.1 Beamforming no Uplink	49
3.4.2 Beamforming no Downlink	49
3.5 Filtragem Espacial	51
3.6 Aplicações em Sistemas de Comunicações Móveis	52
3.6.1 Redução do Delay Spread e Multipath Fading	52
3.6.2 Diagramas Adaptativos	53
3.6.3 Redução da Interferência Co-Canal	54
3.6.4 Redução das Operações de Handovers	55
3.6.5 Redução da Potência Transmitida	55
3.6.6 Segurança	55
3.6.7 Redução da BER	56
3.6.8 Redução da Probabilidade de Outage	56
3.6.9 Compatibilidade	56
3.6.10 Aumento da Capacidade do Sistema	56
4. Análise de Interferências e Alocação de Recursos Utilizando Antenas Inteligentes	57
4.1 Estratégia de Alocação Dinâmica de Canal Autônoma	61
5. Descrição do Ambiente de Simulação e Resultados	63
5.1 Resultados	64
6. Conclusão e Trabalhos Futuros	67
Bibliografia	

1. Introdução

A tendência nos últimos anos na área de telecomunicações consiste na crescente evolução de tecnologias associadas à telefonia móvel, isto se deve ao aumento significativo de usuários e a necessidade por parte das operadoras de telefonia em oferecerem diversos serviços com requisitos de qualidade distintos, enquanto que a faixa de frequência destinada para estes serviços continua limitada [1]. Além de problemas que o sinal de rádio sofre do transmissor até o receptor, como: perda na propagação (*Path Loss*), desvanecimento¹ por multipercurso (*Multipath Fading*), sombreamento (*Shadowing*) e a interferência.

A partir deste contexto, o principal objetivo a ser alcançado na elaboração de um projeto de telefonia celular é otimizar o espectro de frequência para então maximizar a sua capacidade de tráfego. Torna-se obrigatório o desenvolvimento de sistemas mais eficientes para suportar os novos serviços que fazem parte da chamada terceira geração (3G), com destaque para o padrão *Universal Mobile Telecommunications System* (UMTS).

O principal destaque no sistema UMTS é a comunicação multimídia com mobilidade, que consiste na transmissão simultânea de vários tipos de informações, tais como: voz, vídeo, áudio e internet em alta velocidade. Esses serviços podem ser divididos em classes (Conversacional, *Streaming*, Interativo e de *Background*). No entanto, para se alcançar a disponibilidade deles, deve-se atentar para a utilização de recursos escassos da rede (*timeslots*, canais, códigos, etc.), para garantir o fornecimento destes serviços com qualidade ao usuário, conseqüentemente a gestão de recursos torna-se essencial.

Visando a utilização eficiente dos recursos da rede torna-se necessário a busca por mecanismos (algoritmos/estratégias) que possam gerenciar os recursos de rádio, tais como algoritmos de: Alocação de Canais, Controle de Potência, Controle de Admissão, Controle de Congestionamento, Escalonador de Pacotes e *Handover*. Tais mecanismos monitoram parâmetros de qualidade relacionados diretamente a estes serviços, como: perda de pacotes, capacidade máxima total,

¹ O Desvanecimento consiste no enfraquecimento que o sinal sofre na interface aérea, e tem como principal componente a distância entre o transmissor e o receptor do sinal.

atraso, probabilidade de indisponibilidade, aumento da interferência, dentre outros [2].

Existem outros fatores que se relacionam indiretamente ao usuário, como a potência empregada pelo terminal móvel [2], o desempenho de algoritmos de controle de potência estão diretamente ligados à sobrevida da bateria e da interferência gerada pelo transmissor, tal algoritmo é utilizado quando se deseja reduzir as interferências entre canais, principalmente o efeito *Near-Far*. Em função disto, neste trabalho será destinado com mais detalhes as funcionalidades do algoritmo de controle de potência associado a mais promissora tecnologia de antenas desenvolvida atualmente, conhecida como antenas inteligentes (*Smart Antennas*) [1].

O uso de Antenas Inteligentes voltado para a telefonia celular permitirá o aumento da capacidade de tráfego além da redução do principal fator limitante no desempenho de um sistema de comunicação multiusuário, a interferência co-canal. Além de muitas outras vantagens como na maior área de cobertura, redução nas operações de *handover* (através da criação de diagramas adaptativos), redução no número de estações rádio base, melhor aproveitamento da potência empregada pelos transmissores, etc.

1.1 Motivação e Definição do Problema

Com a rápida evolução das tecnologias associadas às comunicações móveis, a busca de pessoas por meios de comunicações que permitam o acesso a informações de forma confiável e a disponibilidade destas mesmas informações em qualquer parte do mundo a qualquer hora, torna-se inevitável o desenvolvimento de mecanismos que tornem isto real ao usuário.

No intuito de satisfazer essa necessidade do mundo moderno, a terceira geração de sistemas celulares foi desenvolvida para tornar esse desejo em realidade. Nos sistemas atuais, segundo [2], há dispositivos que permitem uma hora de conversação a uma taxa aproximada de 10 kbps, considerando a energia dos terminais móveis proporcional a taxa transmitida, logo essa mesma tecnologia a uma taxa de 2 Mbps reduziria para aproximadamente 20 segundos o tempo de vida útil do mesmo dispositivo.

Para garantir o suporte aos serviços que necessitam de altas taxas de transferência de dados, torna-se fundamental a busca por soluções que satisfaçam essa necessidade. No Brasil a 3G é algo recente, a partir do momento que o número de usuários aumentarem, a demanda por serviços também aumentará de forma proporcional, levando a uma possível expansão da capacidade do sistema UMTS [3].

Visando garantir esta demanda por serviços, fica evidente um estudo sobre gestão de recursos, dentre as possibilidades há os algoritmos de gestão dos recursos de rádio. No entanto, muito já se foi pesquisado sobre esses algoritmos e um novo estudo sobre estes algoritmos não será o suficiente para garantir um ganho considerável para o sistema como um todo. Dessa forma, o algoritmo que ainda recebe uma constante atenção ainda é o algoritmo de controle de potência, devido estar diretamente relacionado à capacidade do sistema.

Em conjunto com o algoritmo de controle de potência, a antena inteligente atuará como forma de reduzir a interferência e aumentar a capacidade do sistema. Espera-se que com o aumento da demanda de usuários por serviços, o tráfego de dados fique altamente assimétrico, em função das características que cada classe de serviço tem. Por exemplo, serviços *Streaming* de vídeo e a navegação na internet demandam altas taxas de dados em *downlink* [3]. Logo, um estudo para o *Universal Terrestrial Radio Access Time Division Duplex* (UTRA-TDD) torna-se evidente.

1.2 Contribuição

Em função da complexidade de se reduzir os efeitos provocados pela interferência, e no melhor aproveitamento do espectro e aos diversos aspectos associados à gestão de recursos de rádio, este trabalho pretende contribuir na área de gerenciamento de recursos de rádio nos sistemas de comunicações móveis de terceira geração, em especial o UMTS no modo UTRA-TDD. Através de um estudo que envolve o algoritmo de controle de potência e o uso de antenas inteligentes como forma de solucionar os efeitos provocados pela interferência.

Os resultados obtidos através de simulações terão como finalidade analisar o emprego de antenas que possuem a propriedade de irradiar o seu sinal somente nas direções desejadas (ao contrário de modelos convencionais, como: omnidirecionais),

permitirá a redução da potência transmitida e na interferência “percebida” pelos outros terminais, ocasionando na melhor alocação de recursos e na disponibilidade de novos serviços ao usuário a partir do aumento da capacidade do canal de tráfego.

1.3 Organização

O capítulo 1 ressalta a importância do estudo do tema em questão deste trabalho, apresentando a motivação e definição do problema, além da relevante contribuição para a comunidade acadêmica. O capítulo 2 apresenta o sistema de comunicação móvel UMTS e algumas de suas principais características relevantes como tecnologia proeminente para a 3G. Entre os algoritmos RRM, será destinado um pouco mais de importância em função do algoritmo de controle de potência ser o algoritmo base em estudo.

Já para o capítulo 3 será destinado um conhecimento inicial sobre conjuntos de antenas, beamforming e filtragem espacial para o entendimento da importância das antenas inteligentes em sistemas de comunicações móveis. O capítulo 4 apresenta uma análise dos cenários de interferência com antenas omnidirecionais e antenas inteligentes, além do algoritmo de alocação dinâmica adotado neste trabalho. E no capítulo 5 são apresentados os resultados obtidos através de simulações. O capítulo 6 as conclusões gerais e possíveis trabalhos futuros.

2. Sistema UMTS

Esta seção abordará alguns aspectos necessários referentes ao sistema UMTS, com a intenção de estabelecer um bom entendimento da tecnologia 3G e um detalhamento mais aprofundado do algoritmo de controle de potência e do modo de operação da interface UTRA-TDD, por estes serem objetos de estudo deste trabalho.

2.1 Introdução

O desenvolvimento de tecnologias 3G surgiu como alternativa para se expandir a capacidade dos sistemas de segunda geração (2G), em meados de 1995 o desenvolvimento destas tecnologias sob coordenação do *International Telecommunications Union* (ITU-T), resultou em diversos padrões. Dentre estes o UMTS, através do *European Telecommunications Standards Institute* (ETSI), destacou-se como uma proposta dominante para o sistema 3G através de um intenso trabalho de padronização feito pelo 3rd Generation Partnership Project (3GPP) [4].

O UMTS é composto de diversos documentos com várias especificações, esse conjunto de documentos, chamados de *Releases*, é produzido a cada evolução do sistema. A primeira versão para o UMTS foi o *Release 99*, seguido dos *Releases* 4, 5, 6, dentre outros. A Figura 2.1 ilustra bem o caminho evolutivo do sistema UMTS, indicando cada alteração com estrelas pretas [4].

O objetivo a ser alcançado é a integração de toda uma arquitetura baseada em IP, e a inclusão também desta tecnologia na rede de acesso de rádio, tornando assim de suma importância o uso de QoS (Quality of Service), por parte das operadoras de telecomunicações, pois o controle da rede de acesso de rádio fica direcionado para um controle baseado em serviços. Esta foi a solução encontrada para resolver os atrasos² característicos da rede ATM (*Asynchronous Transfer Mode*), a vantagem se resume na possibilidade de combinar diferentes serviços e

² O ATM caiu em desuso também por não conseguir se estabelecer nas redes de acesso.

tecnologias sob o mesmo protocolo, resultando em uma redução de custos operacionais [4] [5].

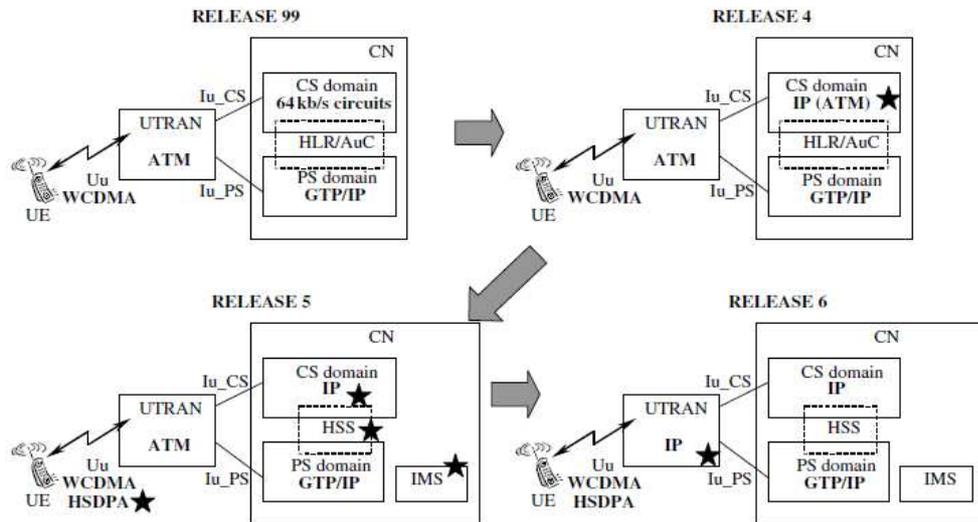


Figura 2.1 - Evolução do Sistema UMTS.

O principal objetivo a ser alcançado pela tecnologia 3G é garantir a interoperabilidade entre as diversas tecnologias de comunicações móveis existentes no mercado mundial. Para que este sistema fique sólido, é desejável que os sistemas 3G sejam bem inovadores em relação aos sistemas 2G, através de requisitos e características como:

- ✓ Serviços Personalizados;
- ✓ Alta eficiência Espectral;
- ✓ Tarifação Adequada para aplicações Multimídias;
- ✓ Co-existência dos modos *Time Division Duplex* (TDD) e *Frequency Division Duplex* (FDD);
- ✓ Co-existência e *Handover* para os Sistemas 2G;
- ✓ Qualidade de Serviços;
- ✓ Serviços Interativos;
- ✓ Taxas de transmissão de até 2 Mbps;
- ✓ Inserção de novos serviços de forma flexível, etc.

A inovação disponível através da tecnologia UMTS, como a banda larga revelou uma grande surpresa em países que já tiveram a oportunidade de experimentar, como o Japão, onde os serviços móveis de banda larga obtiveram grande sucesso chegando a ameaçar o mercado tradicional de computadores pessoais (PCs) e de dispositivos portáteis. Rapidamente ocorreu uma mudança de hábitos, sejam elas no consumismo, de equipamentos, serviços, ou seja, os usuários com necessidade de mobilidade estão deslocando-se para o atraente mercado 3G [4] [5].

Com as velocidades alcançadas pela tecnologia 3G, já é possível pensar em *e-commerce* tanto do lado da empresa quanto do lado do usuário. A interatividade passa a ter um maior destaque em função de tornar de forma simples o *streaming* em tempo real, além de novas oportunidades comerciais como a disponibilização de novas formas de entretenimento e mais informação [5].

Do outro lado, a telemetria vai ser uma área onde o seu aprimoramento poderá trazer imensos benefícios, como na medicina, na indústria no desporto, etc. Na medicina, alguns doentes não necessitarão mais de visitas permanentes ao médico ou internamentos, enquanto os seus sinais vitais e outros dados médicos puderem ser monitorados à distância, podendo também a todo tempo ser conhecida com maior precisão a sua localização [4].

O padrão UMTS foi desenvolvido para atender a grande demanda de serviços de dados com destaque para os serviços multimídia e internet banda larga, uma das vantagens chaves do sistema UMTS é a capacidade de entregar informação aos usuários em qualquer hora e em qualquer lugar [6]. A interface rádio adotada para o UMTS denomina-se *Wideband Code Division Multiple Access* (WCDMA), desenvolvido para o UMTS e padronizado pelo 3GPP. O WCDMA é um sistema de banda larga que permite velocidades de até 2 Mbps, e utiliza como método de múltiplo acesso o *Direct Sequence Code Division Multiple Access* (DS-CDMA) [4].

Nesta forma de múltiplo acesso baseada em código, vários terminais compartilham uma mesma banda de frequência, mas utilizando códigos de espalhamento espectral diferentes. O WCDMA suporta dois modos de operação, que são: FDD e o TDD. O WCDMA/FDD utiliza duas frequências distintas para obter transmissão e recepção (Figura 2.2). Enquanto que o modo WCDMA/TDD utiliza a mesma banda de frequência para *uplink* (UL) e *downlink* (DL) (Figura 2.3), a partir

da divisão do canal em *slots* de tempo, logo haverá pouco desperdício de espectro quando se faz uso de operações assimétricas [4] [7].

Enquanto o modo FDD é destinado especialmente a grandes coberturas, aplicações de banda larga e aplicações de rádio que sejam simétricas, tais como: vídeo e telefonia móvel. O modo TDD se encarrega de altas taxas de dados para aplicações assimétricas e de pouca mobilidade, incluindo serviços que sejam baseados na Internet [4].

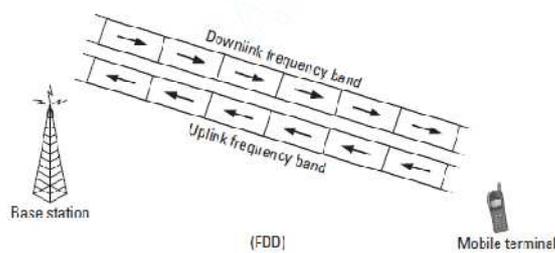


Figura 2.2 - Modo FDD.

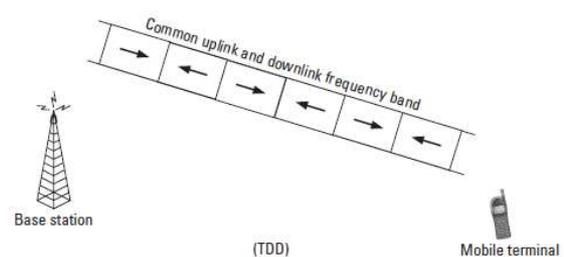


Figura 2.3 - Modo TDD.

Em comparação com o acesso múltiplo por divisão de código (CDMA) o WCDMA permite algumas vantagens bem significativas, tais como [7]:

- ✓ Melhor desempenho em presença de multipercurso;
- ✓ Operação assíncrona das estações rádio base;
- ✓ É um sistema de faixa larga;
- ✓ O seu controle de potência é bem mais rápido;
- ✓ Suporta serviços com distintos QoS, etc.

2.2 Arquitetura do Sistema UMTS

A arquitetura do sistema UMTS pode ser observada na Figura 2.4, o padrão UMTS pode ser analisado como sendo uma extensão das redes existentes e uma base já para a quarta geração (4G). Como podemos observar a arquitetura do sistema UMTS pode ser dividida em três partes, que são: Equipamento do Usuário (*User Equipment - UE*), *UMTS Terrestrial Radio Access Network (UTRAN)* e Núcleo da Rede (*Core Network*) [4] [8].

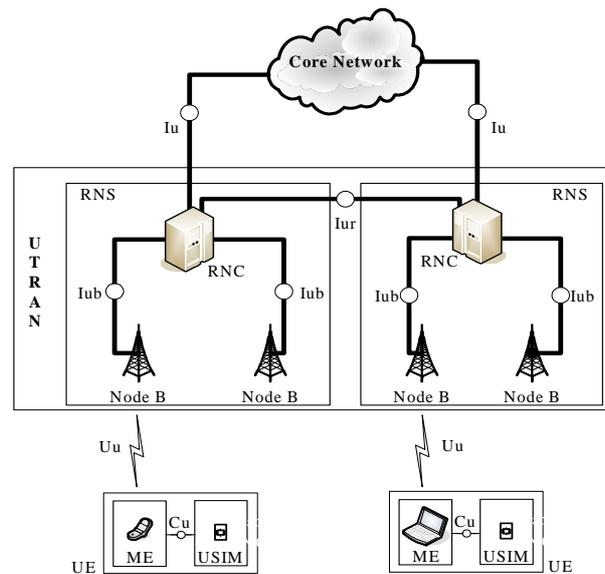


Figura 2.4 - Arquitetura do sistema UMTS.

O UE é composto pelo equipamento do usuário (entende-se por celular) e pelo *UMTS Subscriber Identity Module* (USIM). Esse USIM é um cartão inteligente removível que contém todas as informações do perfil de identificação do usuário, incluindo sua identidade na rede além de dados sobre os serviços que este usuário está autorizado a acessar, permite que seja feita atualizações específicas através da interface aérea, apresenta funcionalidades de segurança e suportar um ou mais perfis do usuário. Tornando-o específico de cada usuário [9].

No sistema UMTS o equipamento do usuário pode atuar de três formas diferentes, como: Modo de operação com comutação de pacotes (*Packet Switched - PS*) / comutação de circuitos (*Circuit Switched - CS*), onde os serviços móveis são incluídos tanto ao domínio com comutação de pacotes quanto no domínio com comutação de circuitos. Estes serviços são apropriados para operar simultaneamente com serviços comutados a circuitos e serviços comutados a pacotes. No modo PS, estes serviços são adicionados apenas ao domínio PS e só podem operar serviços deste domínio. Entretanto serviços do tipo CS, tal como o VoIP, são permitidos a serem oferecidos neste domínio, enquanto no modo CS, só podem operar serviços no domínio CS [4] [9].

A UTRAN também é formada por dois elementos distintos, que são: a Estação Base (também chamada de *Node-B*) e pelo *Radio Network Controller* (RNC). O RNC é o principal elemento no *Radio Network Subsystem* (RNS), ele

gerencia e controla todos os recursos de rádio que estão em seu domínio. Também realiza funções de *Radio Link Control* (RLC) e *Medium Access Control* (MAC). O RNC é o ponto de acesso a todos os serviços providos pela UTRAN à rede fixa, e também é responsável por uma grande parte dos algoritmos da camada rádio [8]. O UMTS define quatro novas interfaces (ver Figura 2.4) [4] [9]:

- Interface *Iu*: Conecta o UTRAN ao núcleo da rede.
- Interface *Uu*: Permite a comunicação entre o UE e o *Node-B*.
- Interface *Iub*: Permite a comunicação entre o RNC e o *Node-B*.
- Interface *Iur*: Realiza a comunicação entre os RNCs, permitindo soft handover ente os RNCs.

Várias *Node-B* estão ligadas a um único RNC realizando a transmissão e recepção do sinal de rádio nas células. Além de suportar os modos FDD e TDD e também é responsável pelo FDD *softer handover* e tem atuação no controle de potência, uma vez que possibilita ao terminal móvel realizar o ajuste de sua potência usando comandos de controle na transmissão (TPC), através do *inner loop power control* (ver capítulo 2.5) [8].

O núcleo da rede (Figura 2.5) é o restante da rede fixa do sistema, ela contém diversos elementos como: o *Home Location Register* (HLR), o *Mobile Services Switching Centre* (MSC), o *Visitor Location Register* (VLR), o *Gateway MSC* (GMSC), o *Serving GPRS Support Node* (SGSN) e o *Gateway GPRS Support Node* (GGSN), etc. É o núcleo da rede que faz a conexão do UMTS com as redes externas, ou seja, é responsável por fazer a comutação, o roteamento e trânsito para tráfego de usuários pela comutação e encaminhamento das chamadas e conexões de dados as redes externas, além de conter um banco de dados e as funções de gerenciamento da rede, permitindo que novos serviços sejam introduzidos no sistema. O *Number Portability DataBase* (NPDB) será empregado para habilitar o usuário a trocar de rede enquanto mantém seu número de telefone antigo [4] [8].

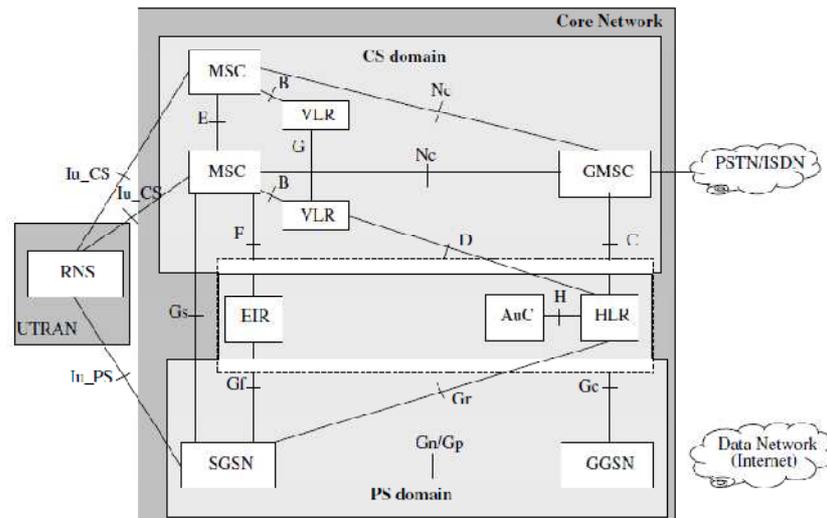


Figura 2.5 - Núcleo da rede com base no Release 99.

2.3 Canal Físico e Estrutura do Frame no UTRA-TDD

O WCDMA pode atuar em dois modos diferentes de duplexação, que são: FDD e TDD. No modo FDD, os enlaces de *UL* e *DL* utilizam duas faixas de frequências distintas. Já no modo TDD, estes mesmos enlaces utilizam a mesma banda de frequência, mas utilizando intervalos de tempo sincronizados, resultando em um canal físico dividido em um momento para transmissão e em outro para recepção (Figura 2.6). A arquitetura do UTRAN é comum para ambos os modos FDD e TDD, a única diferença está na camada física e a interface de aérea (*Uu*).

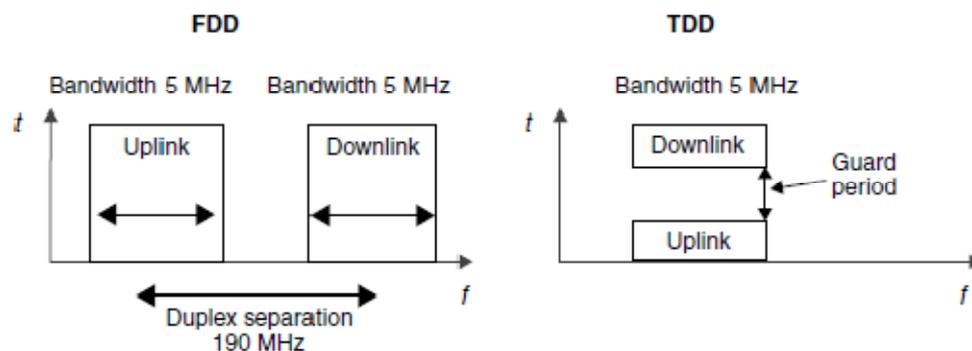


Figura 2.6 - Modo de operação do FDD e TDD respectivamente.

A interferência no modo FDD é completamente evitada no *UL* e *DL* pela separação duplex de 190 MHz. Enquanto que no modo TDD, o compartilhamento da mesma banda de frequência permite que os sinais em ambas as direções de transmissão interfiram um com o outro. Outras comparações podem ser analisadas na tabela 2.1.

	UTRA TDD	UTRA FDD
Tipo de Acesso	TD-CDMA (DSSS)	WCDMA (DSSS)
Método Duplex	TDD	FDD
Modulação	QPSK/8PSK	QPSK
Largura de Faixa	5 MHz/1.66 MHz	5 MHz
Frame	10/5ms	10ms
Nº de slots/frame	15	15

Tabela 2.1 - Comparação entre os modos TDD e FDD.

Os canais físicos para o modo TDD são:

- Canal físico dedicado (DPCH): canal este que é composto pelo canal físico dedicado de dados (DPDCH), encarregado de transportar dados gerados nas camadas superiores. E pelo canal físico dedicado de controle (DPCCH), utilizado para o transporte de informações de controle da camada física.
- Canal físico de controle primário e secundário (CCPCH): transportam dados para procedimentos de *paging*, fazem *broadcasting*, etc.
- Canal físico de acesso aleatório (PRACH): é utilizado para transportar informações de controle do terminal tal, como: pedido para iniciar uma chamada, registrar o terminal ao ser ligado e realizar atualização de localização.
- Canal de Indicação de *Paging* (PICH): utilizado para transmitir informações de paginação.
- Canal de sincronização (SCH): usado para localizar uma célula.

A estrutura física do frame é semelhante ao do modo UTRA-FDD. O comprimento do frame é de 10ms acomodando até 16 usuários por *slot* e tem duas formas diferentes, dependendo da taxa de chip (*chip rate*) que pode ser de 3,84 Mcps ou 1,28 Mcps. O TDD com uma taxa de chip com 3,84 Mcps tem um frame dividido em 15 *slots* de tempo com uma duração de 666 μ s. O frame do UTRA-TDD serve tanto para *UL* como para *DL*.

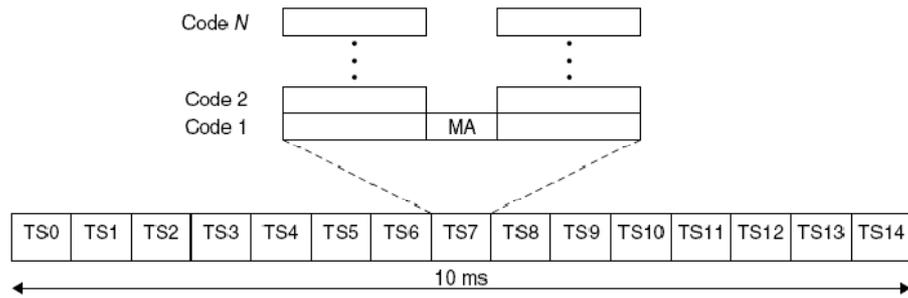


Figura 2.7 - Estrutura do frame no modo UTRA-TDD.

Em cada *slot* do frame é possível fazer a alocação de forma alternada para o tráfego de *UL* e *DL* em cada frame são atribuídos de forma alternada conexões de *UL* ou *DL* (Figura 2.7). Esta forma de alocação flexível pode ser realizada pelo UTRAN garantindo que seja possível cobrir serviços dinâmicos assimétricos, a flexibilidade em distribuição do *slot* na direção de *UL/DL*, garante um uso mais eficiente do espectro.

Portanto, é possível acomodar diferentes requisitos de capacidade para o tráfego do *UL* e *DL*. Isto torna-se bastante interessante para a Internet onde se espera que o tráfego seja muito maior no *DL* do que no *UL*. O limite entre um *UL* e um *DL* no slot de tempo *Switching Point* (*SP*), segundo especificações do 3GPP, em um frame é possível ter apenas um ou múltiplos *SPs*, na Figura 2.8 é possível ver os quatro modos de distribuições possíveis, que são: alocação simétrica com múltiplos *SPs*, alocação assimétrica com múltiplos *SPs*, alocação simétrica com um único *SP* e alocação assimétrica com um único *SP* respectivamente.

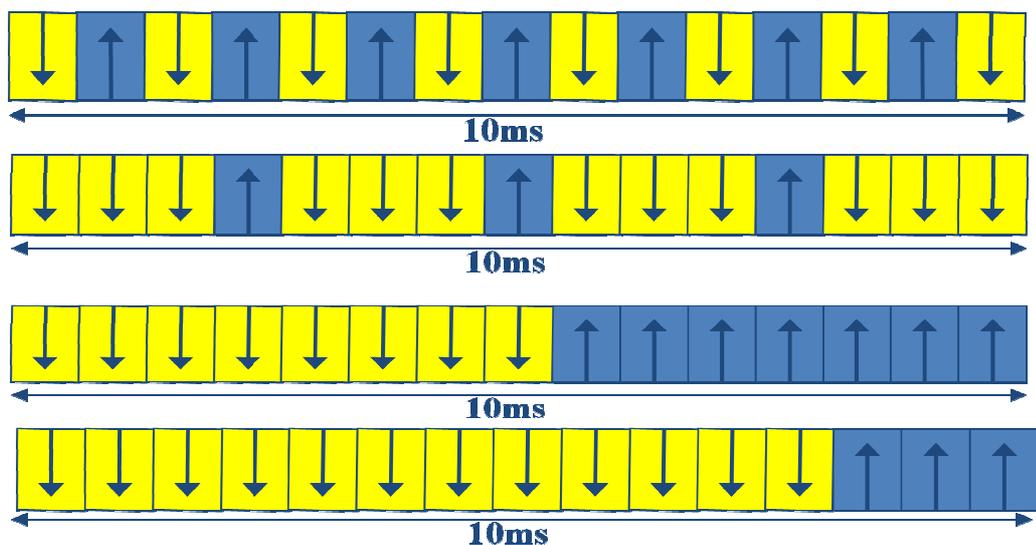


Figura 2.8 - Cenário de alocação no *slot* para *DL* e *UL* nas três distribuições possíveis.

2.4 Cenários de Interferências no UTRA-TDD

No sistema UTRA-TDD há interferências inter-celular e intra-celular, como: interferência entre estações base, entre terminais móveis e de terminais móveis em estações base (Figura 2.9).

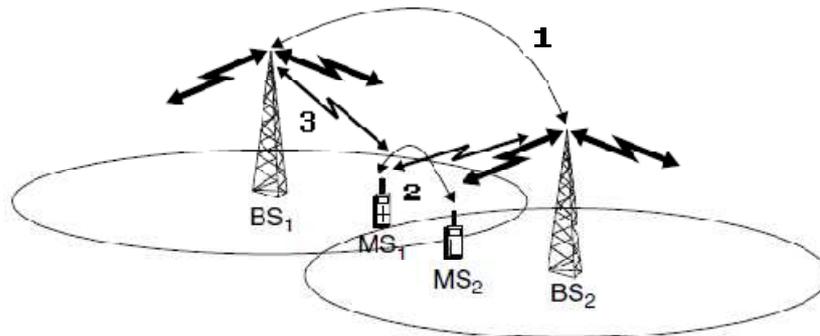


Figura 2.9 - Cenário de interferências possíveis no UTRA-TDD.

A natureza do sistema TDD é basicamente síncrona, logo este tipo de interferência ocorrerá se as estações base não estiverem sincronizadas. Muitos fatores podem levar a um cenário de interferência, mas o principal fator limitante em um ambiente multiusuário é a interferência co-canal que acaba afetando o desempenho do sistema UTRA-TDD. A interferência inter-celular pode ser amenizada utilizando mecanismos inteligentes de alocação dinâmica [5].

2.4.1 Interferência de Terminal Móvel para Terminal Móvel

A interferência de $MS \rightarrow MS$ (2) ocorre se o MS_2 (ver Figura 2.9) está transmitindo, e o MS_1 esteja recebendo simultaneamente na mesma frequência (ou adjacente) na célula adjacente. Este tipo de interferência não pode ser evitado porque não é possível controlar as localizações dos terminais móveis, o que acaba tornando inviável no planejamento da rede. O pior cenário é quando os usuários encontram-se na borda da célula, a interferência pode ser calculada pela equação

(2.1). Existem métodos para contornar este problema como: Alocação Dinâmica de Canais, Controle de Potência, etc.

$$I_{MS \rightarrow MS} = P_{MS} - PL_{MS \rightarrow MS} \quad (2.1)$$

Onde P_{MS} é a potência com que o terminal móvel esta transmitindo e $PL_{MS \rightarrow MS}$ será a atenuação deste sinal transmitido do transmissor até o terminal móvel receptor.

2.4.2 Interferência de Estação Base para Estação Base

No cenário de interferência entre estações base $I_{BS \rightarrow BS}$ (1), ocorrerá se a estação base BS_1 da Figura 2.9 estiver transmitindo e a estação base BS_2 estiver em condição de recepção na mesma frequência (ou adjacente), na célula adjacente. O fator de maior peso neste cenário será a atenuação que o sinal vai sofrer entre o momento da transmissão e o da recepção, se a distância entre as estações for pequena resultará em uma baixa atenuação pela perda de percurso, resultando em uma forte interferência. A melhor forma de solucionar esta situação é distanciar bem as estações base no ato do planejamento da rede. Esta interferência pode ser calculada pela equação (2.2).

$$I_{BS \rightarrow BS} = P_{BS} - PL_{BS \rightarrow BS} \quad (2.2)$$

Onde P_{BS} é a potência com que a estação base esta transmitindo e $PL_{BS \rightarrow BS}$ será a atenuação deste sinal transmitido pela antenna transmissora até a estação base receptora. A interferência entre a estação base e o terminal móvel (3) é a mesma no modo TDD e no FDD.

2.5 Algoritmos RRM

A função propriamente dita para os algoritmos de gerenciamento de recursos de rádio (RRM) é a de gerenciar os recursos limitados da camada de rádio e assegurar as necessidades de QoS para os diferentes tipos de serviços, ou em outras palavras, proporcionar uma utilização ótima dos recursos escassos de forma a maximizar o uso do espectro de frequência. Os algoritmos podem ser executados de forma centralizada, em uma única entidade, ou de forma descentralizada, distribuído por várias entidades, ver Figura 2.10. Os algoritmos são: Controle de Carga (*Control Load - LC*), Controle de *Handover (HC)*, Controle de Potência (*Power Control - PC*), Controle de Admissão (*Control Admission - AC*), Escalonador de Pacotes (*Packet Scheduler - PS*), Alocação Dinâmica de Canais (*Dynamic Channel Allocation - DCA*) [6]. O algoritmo de alocação dinâmica de canais é exclusivo do modo UTRA-TDD [5].

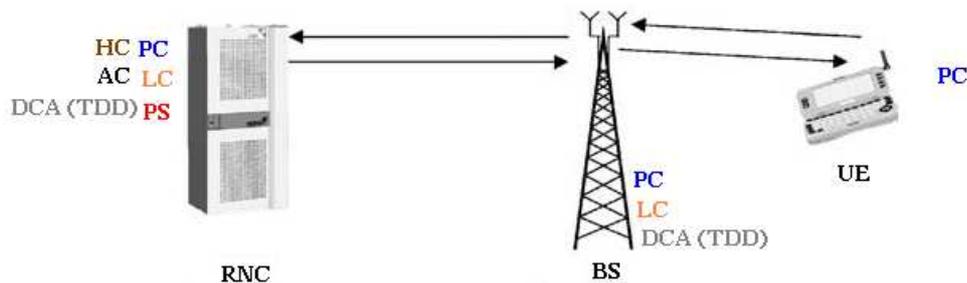


Figura 2.10 - Localizações dos algoritmos RRM.

2.5.1 Controle de carga

Também conhecido como controle de congestionamento é responsável por analisar o tráfego da rede e garantir a estabilidade do sistema assegurando que o sistema não atinja uma situação de sobrecarga. O controle de congestionamento é acionado quando o tráfego é superior à capacidade de transmissão da rede, esse controle pode agir de maneira integrada tanto com o algoritmo de controle de admissão, quanto a mecanismos que estejam relacionados à alocação de potência e tráfego [10].

Em uma situação onde o tráfego aumenta rapidamente pode ser necessário desconectar algum usuário do sistema, ou então tentar manter esse usuário tomando atitudes como aumentando a sua potência de transmissão para este usuário ou até mesmo grupos de usuários possam continuar transmitindo de acordo com a taxa necessária para manter este(s) usuário(s) no sistema. O controle de congestionamento tem uma grande influência na capacidade total do sistema de transmissão, uma detecção rápida do cenário de congestionamento torna-se uma condição necessária para que atitudes possam ser tomadas em um tempo satisfatório de forma a comprometer ao mínimo o sistema.

Um problema característico para este algoritmo pode ser observado quando o sistema tem que tomar alguma atitude em um estado de congestionamento como a supressão de uma conexão, ou seja, de acordo com o perfil do usuário o algoritmo terá que decidir qual cliente terá a sua taxa de dados reduzida ou até mesmo uma situação extrema de desconectar um usuário do sistema.

2.5.2 Controle de Handover

O objetivo deste algoritmo consiste em garantir a mobilidade dos usuários dentro da rede, ou seja, quando um terminal móvel se desloca para uma célula diferente enquanto uma conversação está em progresso, é necessário que a chamada seja transferida automaticamente para um novo canal pertencente à nova estação base.

Esta transição é comumente conhecida como *handover* ou *handoff*, e o seu funcionamento depende da constante monitoramento da intensidade do sinal de um usuário pelas células que estejam mais próximas. E este sinal deve estar sempre acima de um determinado limiar para que a conexão não seja perdida. A Figura 2.11 retrata bem o cenário de handover, onde é possível perceber um relativo enfraquecimento da intensidade do sinal da ERB 1 em relação ao terminal móvel [10].

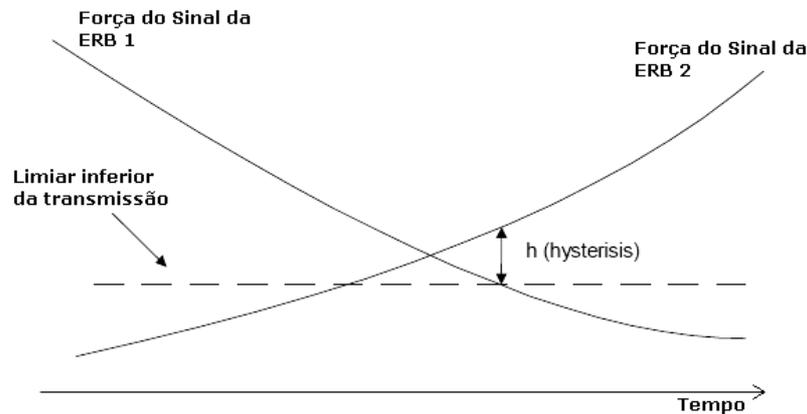


Figura 2.11 - Típico cenário de uma operação de handover.

Adotando como exemplo um usuário que esteja deslocando-se em uma rodovia, a variação do tempo indica que o sinal começa a sofrer uma queda exponencial em virtude do afastamento da ERB 1. Como forma de manter este usuário alocado no sistema, o algoritmo de handover é acionado para tomar uma atitude através do monitoramento e condução desta conexão para a ERB 2 de forma bem imperceptível para o usuário.

Outro processo bastante parecido com o de *handover* tradicional conhecido como *handover* vertical, que não só realiza o mesmo procedimento mais atua também na monitoração e alocação entre tecnologias ou interfaces de redes distintas. Este cenário pode ocorrer quando o algoritmo de controle de carga depara-se com uma situação em que um usuário está prestes a perder sua conexão, como alternativa, o *handover* vertical remanejaria esta conexão para outra rede.

No UMTS existem três tipos de *handovers*, o *soft handover*, o *softer handover* e o *hard handover*. O *soft handover* ocorre entre diferentes estações base (Figura 2.12), o terminal móvel entra em uma área de cobertura controlada por duas estações base e a comunicação ocorre de forma concorrente através de dois canais da interface aérea. Este tipo de *handover* ocorre cerca de 20-40% das ligações, para receber as conexões do *soft Handover* os seguintes recursos adicionais devem ser fornecidos pelo sistema [9]:

- Transmissões adicionais entre as estações base e o RNC;
- Adicionar receptor *rake* nos terminais móveis;
- Adicionar canais com receptor *rake* nas estações base.

O *softer handover* ocorre entre dois diferentes setores da mesma célula, ou seja, o terminal móvel está em dois setores controlados pela mesma estação base, onde a comunicação do tipo UE-ERB é feita de forma concorrente através de dois canais da interface aérea.

No UTRA-TDD o *hard handover* prevalece. Neste tipo de *handover* ocorre uma desconexão temporária do usuário antes deste ser inserido em uma nova célula e a uma frequência que seja diferente na célula-alvo [9].

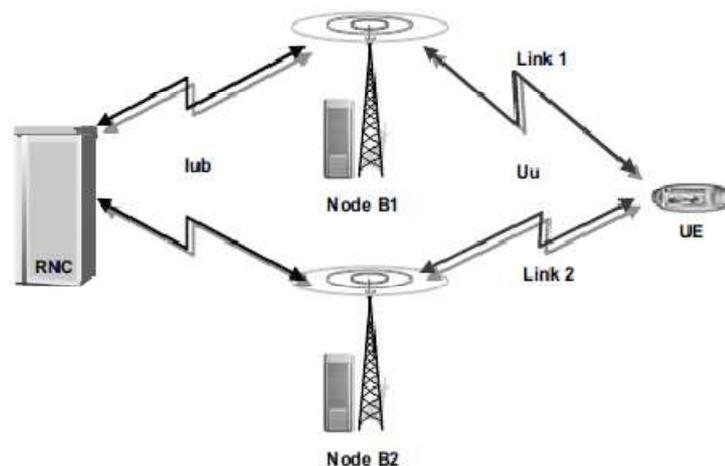


Figura 2.12 - Cenário de um *soft handover*.

2.5.3 Escalonador de Pacotes

Para este algoritmo é atribuída a função de coordenar a alocação de recursos no caso de um tráfego que não seja em tempo real, por exemplo: enviar um e-mail. Em função de exigências quanto a parâmetros de QoS, deve-se averiguar para que os recursos escassos da rede sejam aproveitados da melhor forma possível, de modo a não comprometer a capacidade da célula gerando falta de recursos e até contribuindo no aumento da interferência. Principalmente para aplicações de tempo real, por exemplo: voz, onde as exigências de QoS são pouco tolerantes a atrasos [4].

2.5.4 Controle de Admissão

O algoritmo de controle de admissão é responsável por preservar a qualidade das conexões que estão em curso, enquanto novos usuários estão sendo admitidos pelo sistema. Este controle deve ser feito de modo a assegurar a estabilidade e a capacidade global sem comprometer aqueles que já estão alocados [9].

2.5.5 Alocação Dinâmica de Canais

A função do algoritmo de alocação dinâmica de canais consiste na distribuição de canais nas células de acordo com a demanda exigida pela rede para alocação de usuários, nesta abordagem de alocação, as células não possuem canais próprios, estes canais são requisitados somente quando for necessário. Este sistema de alocação representa uma grande vantagem em tráfegos que sejam variáveis no tempo e não uniformes, porém apresenta como desvantagem a alta complexidade e um custo elevado para ser implementado.

2.5.6 Controle de Potência

O controle de potência é uma técnica bastante utilizada em sistemas do tipo CDMA, com o objetivo de reduzir as interferências entre canais, principalmente o efeito *Near-Far*. De acordo com a Figura 2.12, o *Near-Far* consiste quando dois ou mais transmissores transmitem simultaneamente e a uma mesma potência, o receptor, estação base, receberá um sinal de maior potência daquele transmissor que estiver mais próximo, devido apresentar menor atenuação. Desse modo o transmissor mais afastado (MS-1) terá dificuldades de fazer com que o seu sinal seja “compreendido” pelo mesmo receptor devido o sinal transmitido por um usuário corresponder a um ruído para os outros usuários, logo a relação sinal - ruído será muito maior para aquele que se encontra mais afastado da estação base [5].

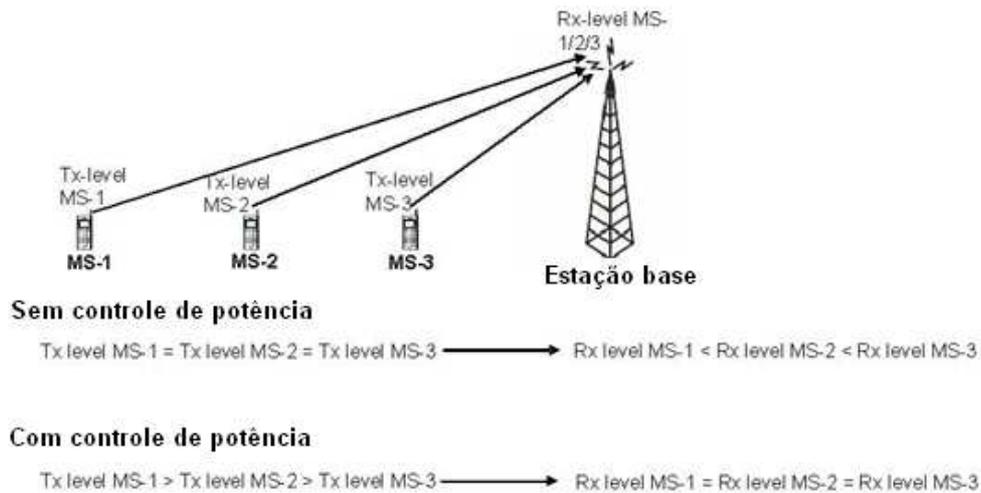


Figura 2.12 - Cenário do efeito *Near-Far*.

Neste problema cada usuário representa uma fonte de interferência para os outros usuários, e caso um usuário transmita a uma potência maior do que a dos demais usuários, então ele provocará um nível bem mais elevado de interferência que os demais usuários. Daí a importância de se realizar o controle de potência para que todos os usuários sejam recebidos com a mesma potência pela estação base. Outro motivo para se realizar o controle de potência seria uma maior sobrevida para a bateria do transmissor móvel [10] [11].

O controle de potência pode ser desempenhado pelo RNC, pela ERB caracterizando uma arquitetura centralizada do controle de potência ou pelo terminal móvel caracterizando uma arquitetura distribuída [12]. O controle de potência pode ser dividido em dois mecanismos, que são: *Open Loop Power Control* e *Closed Loop Power Control* (que é a combinação do *Inner Loop Power Control* com o *Outer Loop Power Control*) (Figura 2.13).

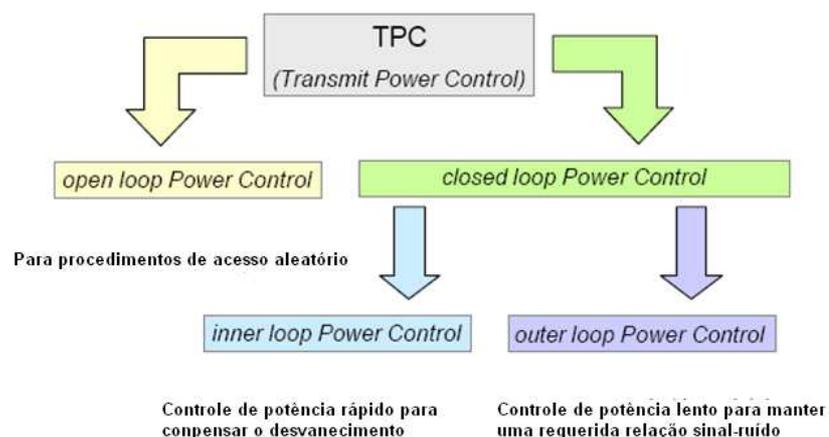


Figura 2.13 - Tipos de controle de potência.

2.5.6.1 Open Loop Power Control

O open loop PC é responsável por ajustar a potência de saída do terminal móvel para um determinado valor especificado, ou seja, é usado para ajustar a potência de transmissão no canal físico de acesso no início está acessando a rede. O UE mede a potência recebida em downlink (*Common Pilot Channel-CPICH*, canal físico), para estimação da atenuação (*Path Loss*) introduzida pelo canal e do nível da SIR (*Signal-to-Interference Ratio*) recebida. Com os dados da perda de percurso e da interferência mais o ruído que é transmitido pela rede e a SIR_{min} requerida, a potência de transmissão pode ser calculada pela equação (2.3) [4] :

$$P_t = L \cdot I \cdot SIR_{\min} = \frac{P_{t_{pilot}}}{P_{r_{pilot}}} \cdot I \cdot SIR_{\min} \quad (2.3)$$

Onde $P_{t_{pilot}}$ e $P_{r_{pilot}}$ são as potências de transmissão e recepção no canal CPICH respectivamente, L é a atenuação introduzida pelo canal e sendo I a interferência mais o ruído que é transmitido pela rede e Sir_{\min} é o valor mínimo para que haja transmissão com qualidade [12]. O open loop PC não precisa enviar comandos de transmissão (*TPC-Transmit Power Control*), não sendo necessário um canal de controle dedicado no enlace reverso. Nesta estratégia o modo de obtenção da atenuação não é muito preciso e tem no terminal móvel a principal fonte de incertezas [13], resultado do impacto das condições ambientais, principalmente a temperatura. O open loop PC tem uma tolerância de ± 9 dB (condições normais) ou ± 12 dB (condições extremas), o *open loop* tem o mesmo princípio de funcionamento no modo FDD e no modo TDD [5].

2.5.3.2 Closed Loop Power Control

Como o procedimento do *open loop* PC não é suficiente para garantir a precisão necessária, uma solução mais bem sofisticada deve ser introduzida. E a solução que tem sido adotada para este propósito é o *closed loop* PC [4].

Esta estratégia consiste em ajustar a potência de transmissão baseando-se

nos valores da SIR. Se o UE mede que a sua SIR está abaixo do valor mínimo da SIR (SIR_{min}) requerida, então este envia um comando TPC ao transmissor indicando que este deve aumentar a potência transmitida. Se a SIR do UE for maior que a SIR_{min} , então o TPC indica ao transmissor que o UE deve reduzir sua potência de transmissão, se o número de comandos forem concordantes para o aumento da potência o UE irá aumentar a potência, se existir um comando para baixar a potência o UE irá reduzir sua potência de transmissão.

No *downlink* ocorre apenas a inversão de papéis entre o UE e a estação base. O desempenho do *closed loop* PC é afetado pela velocidade de deslocamento do terminal móvel, o retorno introduz atrasos por causa da necessidade em realizar medições no canal. O *closed loop* PC é a combinação do *inner loop* PC com o *outer loop* PC. O *closed loop* PC necessita de um canal dedicado de sinalização na direção contrária para transmitir os comandos de controle de transmissão [4].

2.6.3.3 Inner Loop Power Control

O inner loop PC funciona da seguinte maneira: o móvel envia sua SIR para a ERB, a ERB verifica se esta SIR é maior ou menor que a SIR_{target} . Caso esta SIR seja menor que a SIR_{target} então a ERB envia comandos TPC para o UE aumentar sua potência de transmissão, se a SIR for maior que a SIR_{target} então a ERB envia comandos TPC para o UE diminuir a sua potência de transmissão. A SIR_{target} é fixada segundo a BLER (*Block Error Rate*) ou BER (*Bit Error Rate*). Os valores pré-definidos para o inner loop PC são retirados do RNC pelo outer loop PC (Figura 2.14).

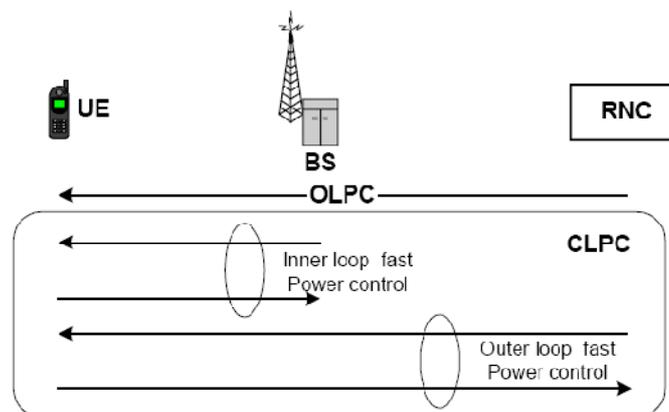


Figura 2.14 - Cenário dos métodos utilizados pelo algoritmo de controle de potência.

Dois algoritmos alternativos denotados como “Algoritmo 1 e 2”, são especificados para o UE interpretar os comandos TPC enviados pela ERB. A ERB gera comandos de controle de transmissão uma vez por slot segundo a seguinte regra:

$$\begin{aligned} & \text{If } (SIR_{est} > SIR_{alvo}) \\ & \quad \text{Then } TPC_cmd = "0" \\ & \quad \text{Else } TPC_cmd = "1" \end{aligned}$$

No algoritmo 1 a potência transmitida é atualizada em cada slot de tempo (10/15ms). Isto é, aumentando ou diminuindo por um valor pré-fixado. O algoritmo 1 é melhor utilizado em situações de atenuações lentas [4] [5].

- Se o comando do TPC recebido é igual a “0” então o TPC_cmd para aquele slot é -1.
- Se o comando do TPC recebido é igual a “1” então o TPC_cmd para aquele slot é 1.

Já o algoritmo 2 é uma variação do algoritmo 1, onde as potências transmitidas podem ser atualizadas a cada 5 slots de tempo, simulando pequenos passos de atualizações na potência[6]. O algoritmo 2 é melhor utilizado para condições de fading rápidas (acima de 80km/h), e para velocidades de pedestre (menor que 3km/h)[4] [5].

- Se todos os 5 comandos TPC estimados são “1”, então a potência transmitida é reduzida por 1dB e o TPC_cmd no 5^o slot é igual a 1.
- Se todos os 5 comandos TPC estimados são “0”, então a potência transmitida é aumentada por 1dB e o TPC_cmd no 5^o slot é igual a -1.
- De qualquer outro modo a potência transmitida não é alterada e o TPC_cmd no 5^o slot é igual a 0.

2.5.3.4 Outer Loop Power Control

É utilizado para manter a qualidade da comunicação em níveis requeridos de qualidade de serviço para o usuário [3]. No uplink o outer loop PC é responsável por ajustar a SIR_{target} na ERB adequada para cada uplink individual no inner loop PC. Um algoritmo baseado na verificação de redundâncias cíclicas (CRC-Cyclical Redundancy Check) é utilizado como medidor de qualidade [5].

No DL o *outer loop PC* é realizado pelo UE, este ajusta a SIR_{alvo} para o downlink do *inner loop PC* usando um algoritmo proprietário que fornece a mesma qualidade de referência medida *Block error rate* (BLER) atribuída pelo RNC [4].

O processo de otimização da potência é um processo iterativo, para se fazer o cálculo da potência deve-se ter presente elementos como a velocidade do terminal móvel, a taxa de bits e o tipo de serviço que esteja sendo utilizado [5]. No WCDMA o controle de potência em uplink e downlink estão presentes, assim como o *soft/softer handover* e a ortogonalidade no *downlink*. Todos esses elementos desenvolvem um impacto relevante no desempenho do sistema [3].

3. Antenas Inteligentes

Este capítulo abordará alguns aspectos relevantes da teoria de antenas inteligentes com outros conceitos básicos de arranjo de antenas, beamforming e filtragem espacial. Além de algumas vantagens de se utilizar antenas inteligentes em sistemas de comunicações móveis.

3.1 Introdução

As antenas inteligentes (*Smart Antennas*) foram inicialmente desenvolvidas para aplicações militares como forma de suprimir os sinais interferentes do inimigo, logo então surgiu a oportunidade de se usar essa tecnologia em sistemas de comunicações móveis em função do aumento da interferência que estava degradando o sistema e reduzindo a capacidade de alocar usuários na rede.

O maior problema consistiu em aplicar a tecnologia das antenas inteligentes em um meio de comunicação onde o tráfego de dados era muito mais intenso e também em função do tempo limitado para se realizar computacionalmente operações mais complexas. Com o aprimoramento de técnicas digitais, foi possível realizar processamentos mais robustos e o desenvolvimento de softwares específicos, tornando assim uma realidade o uso destas antenas em sistemas de comunicações móveis [13].

As antenas inteligentes são arranjos de antenas com a capacidade de direcionar o seu diagrama de radiação somente nas direções desejadas ao mesmo tempo em que é realizado o cancelamento de sinais interferentes (Figura 3.1) [14]. Essas antenas são conhecidas alternativamente como *beamforming digital* (DBF), ou no caso de se utilizar algoritmos adaptativos podem ser chamadas de arranjos adaptativos. Esta capacidade de adaptar o seu diagrama de radiação é conseguida através de um *Digital Signal Processor* (DSP), que realiza o processamento digital do sinal, e é onde se concentra toda a “inteligência” da antena [13].

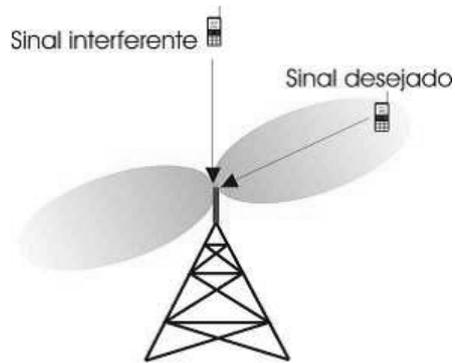


Figura 3.1 - Exemplo de transmissão usando antenas inteligentes.

Antenas inteligentes são multidisciplinares, pois sua teoria está relacionada entre vários tópicos (Figura 3.2), como: eletromagnetismo, antenas, comunicações, propagação, processos aleatórios, processamento digital de sinais, teorias adaptativas, estimação espectral, etc. Isto demonstra a complexidade que há no seu desenvolvimento, e a necessidade de tratá-las de uma forma mais global não ficando restrito a aplicações específicas [13].

Antenas Inteligentes prometem melhorar o desempenho de sistemas de radar, além de aumentar a capacidade de sistema de comunicações móveis sem fio através da implementação da técnica de múltiplo acesso por divisão espacial (SDMA) ³ [13].

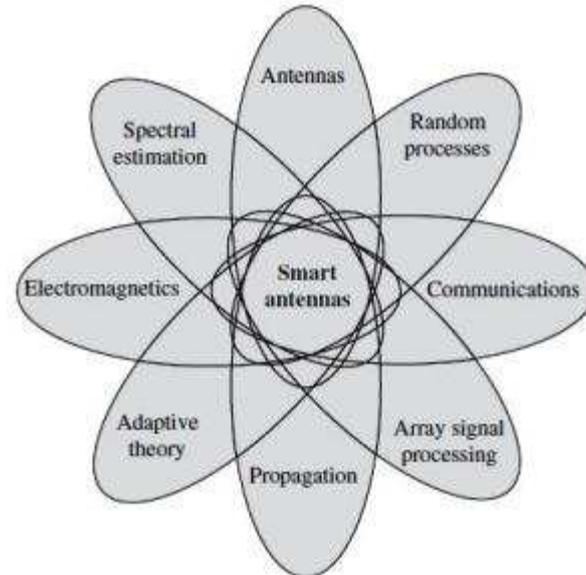


Figura 3.2 - Diagrama de Venn mostrando a interdisciplinaridade das antenas inteligentes.

³ Múltiplo acesso por divisão espacial (SDMA) consiste na separação feita por conjuntos de antenas possibilitando a geração de vários feixes direcionais, que podem ser focados para determinados transmissores.

3.2 Níveis de Inteligência

Podemos classificar as antenas inteligentes em três níveis de “inteligência” quanto à geração de diagramas adaptativos, que são: Comutação de Lóbulos (*Switched Lobe*), Arranjo Defasador Dinâmico (*Phased Array*) e Arranjo Adaptativo (*Adaptive Array*).

3.2.1 Comutador de Lóbulos

Este sistema adaptativo realiza uma análise dos padrões de radiação e muda a direção do diagrama de radiação para coordenadas pré-definidas (Figura 3.3), ou seja, o sistema já possui uma série de direções pré-configuradas onde é feito apenas o chaveamento entre os padrões pertencentes ao sistema. Em comparação com as antenas não adaptativas do sistema convencional, este modelo já apresenta um ganho bem expressivo [12].

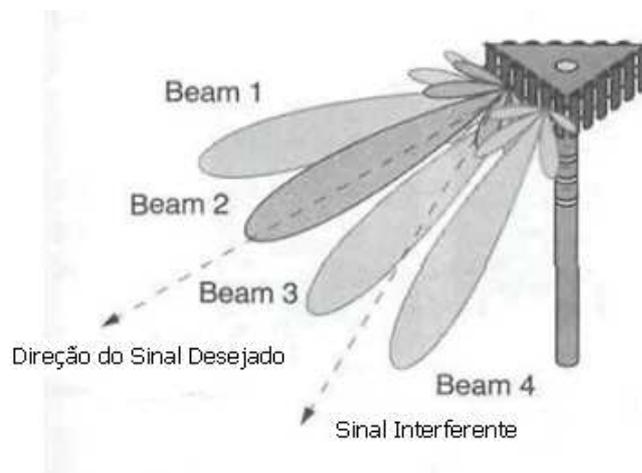


Figura 3.3 - Exemplo de funcionamento do comutador de lóbulos.

3.2.2 Arranjo Defasador Dinâmico

Este é um modelo generalizado do sistema comutador de lóbulos, onde o seu diagrama de radiação é gerado com base em dados de ondas que incidem sobre a antena além de possuir uma variedade bem superior na geração de diagramas de radiação. Através de algoritmos, este sistema pode prever com uma margem de erro

aceitável, a direção de chegada entre a onda e a antena, podendo assim alterar suas fases de forma a se obter um diagrama de radiação mais diretivo (Figura 3.4) ao mesmo tempo em que é feito o cancelamento de sinais interferentes possibilitando maximizar a potência recebida do sinal [12] [16].

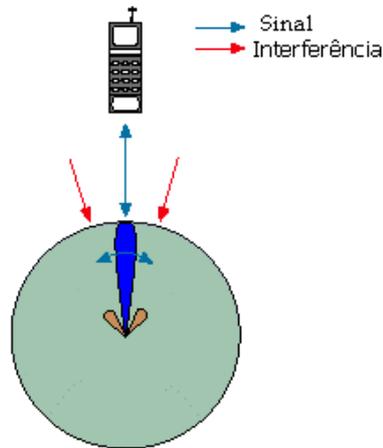


Figura 3.4 - Exemplo de funcionamento do arranjo defasador dinâmico.

3.2.3 Arranjo Adaptativo

Esta é uma tecnologia mais evoluída em nível de transmissões e complexidade na geração de diagramas adaptativos, pois é necessário que o sistema saiba a posição das fontes. Isto é, através de métodos de estimação do ângulo de chegada (DOA – *Direction of Arrival*) o sistema conseguirá cancelar o sinal de fontes interferentes e gerar um sinal mais intenso através de técnicas de diversidade espacial realizando a combinação de sinais provenientes de diferentes percursos (Figura 3.5). Esta técnica de geração de lóbulos permite maximizar da relação sinal-interferência e mais o ruído (SINR), a diferença principal deste arranjo adaptativo para o arranjo defasador esta na complexidade do algoritmo de *beamforming* no receptor [12] [15].

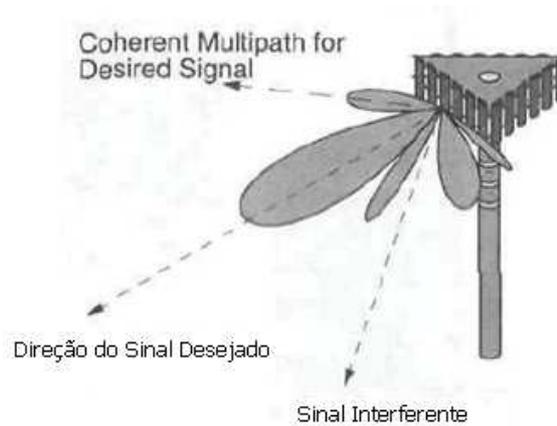


Figura 3.5 - Exemplo de funcionamento do arranjo adaptativo.

3.3 Arranjo de Antenas

Arranjos de antenas podem assumir qualquer geometria, dentre as diversas geometrias de interesse para o sistema de comunicação móvel temos: Arranjo Linear, Retangular e Circular. A grande vantagem de se utilizar um arranjo de antenas esta na possibilidade de se realizar uma varredura espacial do lóbulo principal, sendo necessário apenas que se altere a corrente de excitação de cada elemento do arranjo. Sem o uso de um arranjo de antenas a varredura do lóbulo principal só será possível fazendo o ajuste de posição mecanicamente [14] [16].

3.3.1 Fator de Arranjo

A padronização do diagrama de radiação produzido por um arranjo de antenas depende do tipo de antena elementar que está sendo utilizado, depende também da localização de cada elemento no espaço em relação aos outros elementos presentes e da alimentação de cada elemento do arranjo [14].

Assim, o resultado da soma vetorial dos campos radiados por cada elemento separadamente, corresponderá ao campo elétrico total radiado pelo arranjo de antenas, adotando que todos os elementos do arranjo são do mesmo tipo, temos que:

$$\vec{E}(r, \theta, \phi) = \frac{e^{-jkr}}{r} \vec{e}(r, \theta, \phi) AF(\theta, \phi) \quad (3.1)$$

Onde $\vec{e}(r, \theta, \phi)$ corresponde ao campo elétrico gerado por um elemento que esta localizado na origem do sistema de coordenadas esféricas (r, θ, ϕ) . E $AF(\theta, \phi)$ representa o fator de arranjo da estrutura, e $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ é a constante de propagação. O fator de arranjo pode ser calculado pela expressão (3.2), considerando todos os elementos como fontes isotrópicas para um arranjo arbitrário de L antenas (Figura 3.6).

$$AF(\theta, \phi) = \sum_{l=1}^L I_l^* e^{j\xi(\theta, \phi)} \quad (3.2)$$

Sendo I_l^* a corrente de alimentação de cada elemento da antena, e $\xi(\theta, \phi)$ o correspondente defasamento no espaço de cada elemento. De acordo com a Figura 3.6 as L antenas estão posicionadas em um meio, onde vários sinais estão incidindo (nesse caso fontes). Adotando a condição de campo distante os sinais que chegam a todas as L antenas do arranjo possuem o mesmo módulo, logo a fase de um sinal na l -ésima antena está adiantado τ_l segundos em relação à origem do sistema. Esse atraso pode ser calculado pela expressão (3.3) [14].

$$\tau_l(r, \theta, \phi) = \frac{\vec{r}_l(r, \theta, \phi) \cdot \vec{v}(\theta, \phi)}{c} \quad (3.3)$$

Para a equação (3), $\vec{r}_l(r, \theta, \phi)$ será o vetor posição do l -ésimo elemento e $\vec{v}(\theta, \phi)$ o vetor unitário na direção de (θ, ϕ) , e c será a velocidade da luz no ambiente de propagação onde a antena esteja imersa [14].

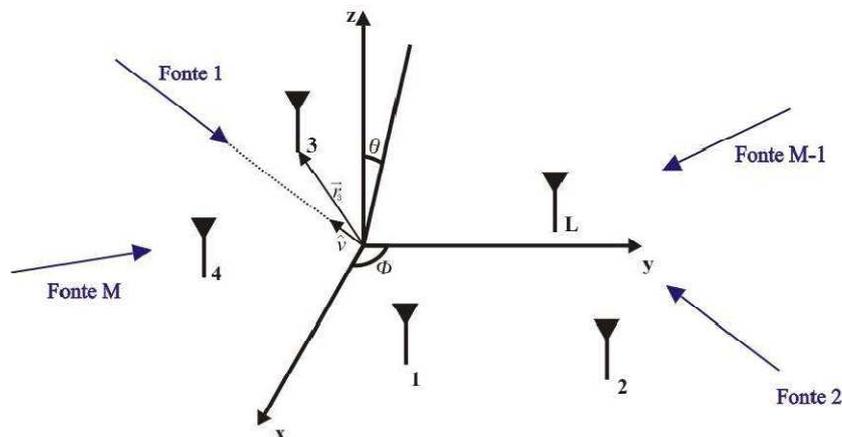


Figura 3.6 - Representação de um arranjo arbitrário de antenas.

3.3.2 Arranjo Linear de Antenas

No arranjo linear, todos os elementos estão alinhados ao longo de uma linha reta e igualmente espaçados. Para o arranjo linear o defasamento temporal pode ser obtido a partir da expressão (3.4) [13] [14].

$$\tau_l(\theta) = (l-1)d \frac{\cos \theta}{c} \quad (3.4)$$

Onde d é a distância entre os elementos adjacentes do arranjo e f a frequência do sinal, a obtenção em radianos pode ser obtida pela expressão (3.5) [14].

$$\xi_l(\theta) = 2\pi\tau_l(\theta)f = (l-1)kd \cos \theta \quad (3.5)$$

Fazendo-se a combinação das equações (3.5) com (3.2) obtemos o fator de arranjo (3.6) para a disposição linear dos elementos (Figura 3.7), nota-se que o fator de arranjo é independente do valor de ϕ , em função da simetria da estrutura no plano de azimute [14].

$$AF(\theta) = \sum_{l=1}^L I_l^* e^{j(l-1)kd \cos \theta} \quad (3.6)$$

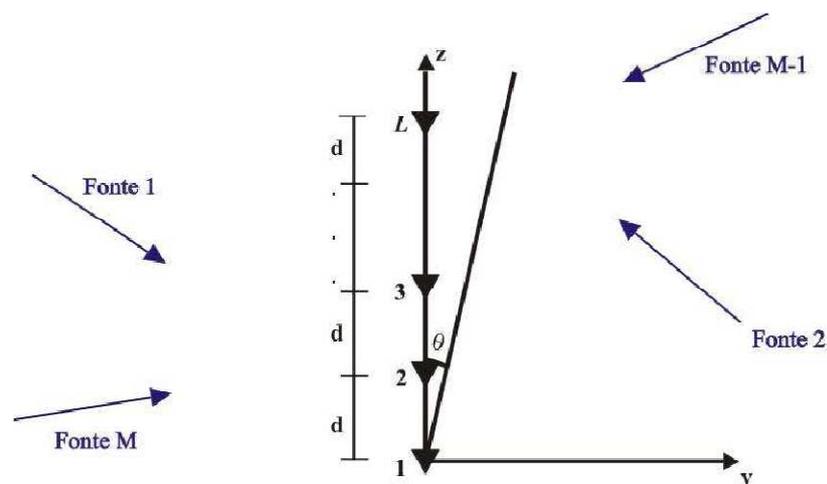


Figura 3.7 - Arranjo Linear com elementos espaçados igualmente por d .

3.3.3 Arranjo Retangular de Antenas

Ao contrário do modelo linear que apresenta um procedimento matemático mais trivial e também algumas limitações práticas, o arranjo retangular (Figura 3.8) por ser multidimensional possui a capacidade de realizar uma varredura nos planos de azimute e de elevação [13] [14].

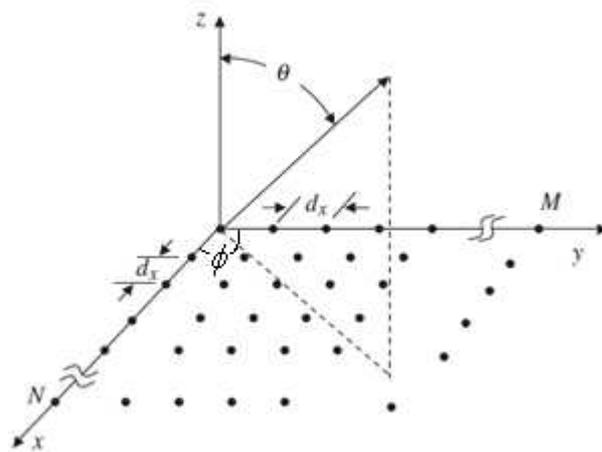


Figura 3.8 - Arranjo retangular de antenas com $M \times N$ arranjos de elementos.

Para o caso do arranjo retangular, o sinal que parte de uma fonte que esta situada na posição (θ, ϕ) estará adiantada em τ_{lxly} segundos em relação ao elemento de referência, esse tempo pode ser obtido pela expressão (3.7) para o l -ésimo elemento [14].

$$\tau_{lxly}(\theta, \phi) = \frac{lx dx \sin \theta \cos \phi + ly dy \sin \theta \sin \phi}{c} \quad (3.7)$$

Onde lx e ly são os índices da coluna e da linha do elemento respectivamente, e o defasamento pode ser calculado pela equação (3.8), enquanto o fator de arranjo pode ser obtido a partir da equação (3.9) [14].

$$\xi_{lxly}(\theta, \phi) = 2\pi \tau_{lxly}(\theta, \phi) f = k(lx dx \sin \theta \cos \phi + ly dy \sin \theta \sin \phi) \quad (3.8)$$

$$AF(\theta, \phi) = \sum_{lx=1}^{Lx} \sum_{ly=1}^{Ly} I_{lxly}^* e^{jk(lxdxsen\theta\cos\phi + lydysen\theta sen\phi)} \quad (3.9)$$

3.3.4 Arranjo Circular de Antenas

Assim como o arranjo retangular, o arranjo circular (Figura 3.9) também é multidimensional, e apresenta os seus elementos espaçados em forma de um anel. O procedimento para se obter o fator de arranjo a partir da equação (3.9) consiste em substituir o $lxdx$ e o $lydy$ pelas coordenadas cartesianas dos elementos do arranjo, para o l -ésimo elemento temos que $x_l = a \cos \varphi_l$ e $y_l = a \sin \varphi_l$, onde $\varphi_l = \frac{2\pi l}{L}$ e a como sendo o raio do arranjo. Assim, um sinal transmitido por uma fonte que se encontra situado na posição (θ, ϕ) estará adiantado $\tau_l(\theta, \phi)$ segundos em relação à origem de coordenadas do sistema [14].

Logo, o defasamento em segundos e radianos poderá ser calculado a partir das equações (3.10) e (3.11) respectivamente, e o fator de arranjo pela equação (3.12) [14].

$$\tau_l(\theta, \phi) = \frac{a \cos \varphi_l \sin \theta \cos \phi + \sin \varphi_l \sin \theta \sin \phi}{c} = \frac{a \sin \theta \cos(\phi - \varphi_l)}{c} \quad (3.10)$$

$$\xi_l(\theta, \phi) = 2\pi \tau_l(\theta, \phi) f = k a \sin \theta \cos(\phi - \varphi_l) \quad (3.11)$$

$$AF(\theta, \phi) = \sum_{l=1}^L I_l^* e^{j k a \sin \theta \cos(\phi - \varphi_l)} \quad (3.12)$$

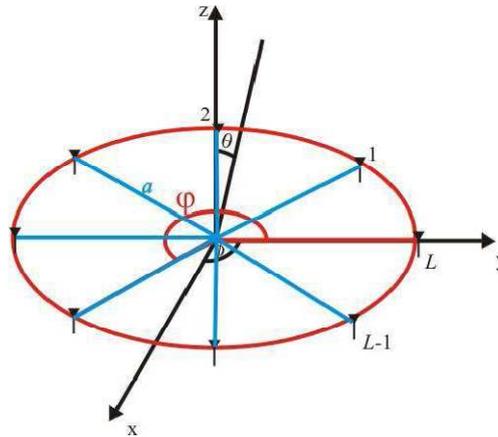


Figura 3.9 - Representação de um arranjo circular de antenas.

3.4 Beamforming

O processo de combinar os sinais de diferentes percursos, para então se gerar um diagrama de radiação em uma determinada direção é comumente conhecido como *beamforming*. Esta técnica é comumente utilizada em sistemas de comunicações móveis para a maximização do uso dos recursos de rádio no domínio do espaço, podendo se suprimir sinais que sejam considerados como indesejáveis pelo sistema.

Esta capacidade de processamento só foi possível de se realizar através do avanço das técnicas digitais, principalmente no aprimoramento do processamento digital de sinais e dos conversores analógico/digitais (A/D), a Figura 3.10 mostra o contraste entre o esquemático de um *beamforming* analógico (a), e um *beamforming* digital (b) [13].

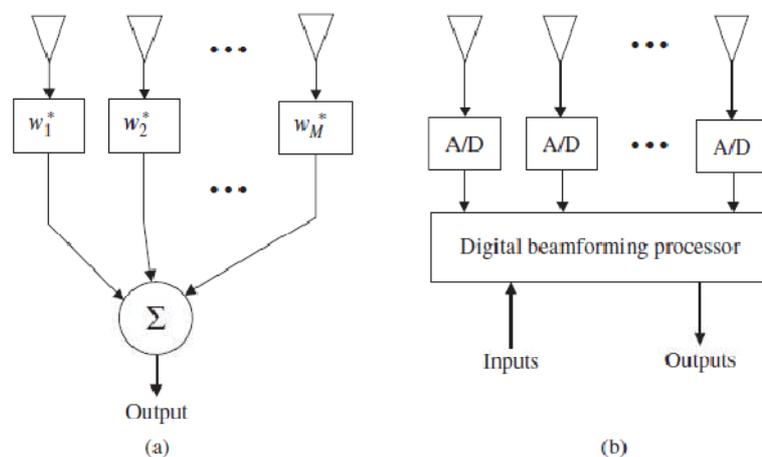


Figura 3.10 - a) *Beamforming* analógico b) *Beamforming* Digital.

O impacto de se usar *beamforming* resulta primeiramente em uma redução da potência transmitida em função do ganho obtido, pois esta técnica disponibiliza filtragem espacial na potência transmitida no *DL* para o terminal móvel de interesse. Por exemplo, adotando um cenário ideal com um arranjo de quatro antenas é possível conseguir um ganho proporcional de quatro, enquanto a potência transmitida pode ser reduzida por um fator também de quatro. Outra vantagem de se usar filtragem espacial resulta da redução da interferência entre os usuários que estão associados a diferentes lóbulos, resultando em um aumento expressivo de usuários suportados pelo sistema [5].

3.4.1 Beamforming no Uplink

O receptor *rake* com filtro espacial (Figura 3.11) pode ser implementado usando antenas inteligentes, cada *finger* do receptor *rake* pode formar um diagrama de radiação, neste caso cada *finger* pode otimizar um lóbulo para a recepção de apenas uma componente do *multipath*. Assumindo que um receptor *rake* com três *fingers*, os três *fingers* idealmente manterão contato com as três componentes de maior intensidade do *multipath* que chegam aos instantes t_0 , t_1 e t_2 de diferentes ângulos [12].

O peso $w_{k,0}$ que está associado com o *finger* 0, onde este vai otimizar a recepção da componente do *multipath* que chega no instante t_0 , por apontar o lóbulo principal na direção desta componente, e atribuir nulos na direção de interferentes e sinais que chegam atrasados [12].

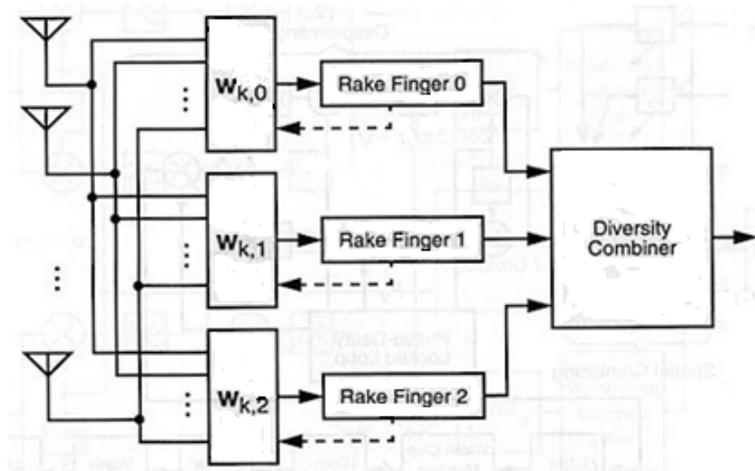


Figura 3.11 - Receptor *rake* com filtro espacial.

3.4.2 Beamforming no Downlink

A dificuldade neste caso esta em encontrar valores ótimos para os pesos do arranjo no receptor *rake*, no TDD-WCDMA o atraso entre a transmissão e a recepção deve ser o menor possível, isto vai estar sujeito a velocidade de deslocamento do terminal móvel. Uma técnica sugerida é a aproximação geométrica de estimação do ângulo de chegada (AoA). A suposição esta na reciprocidade direcional, ou seja, a direção de chegada do sinal no uplink é mesma direção em que o sinal deverá transmitir no downlink [12]. Apesar das imensas dificuldades, no caso do WCDMA esta técnica torna-se viável pela existência de canais piloto auxiliares, e pela capacidade de formação de lóbulos direcionais (Figura 3.12) [14].

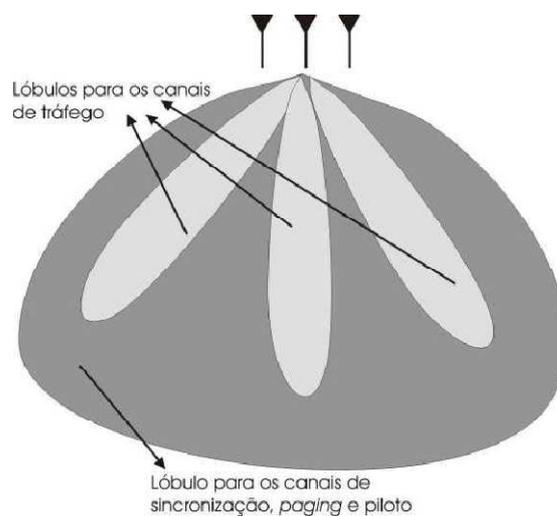


Figura 3.12 - Beamforming no downlink para diferentes tipos de canais.

3.5 Filtragem Espacial

O uso de um filtro espacial na construção de uma antena inteligente pode ser visto como um elemento que permitirá a redução da interferência, ocasionando no aumento da capacidade e qualidade no sistema como um todo. Esta habilidade só pode ser alcançada através da integração de tecnologias de rádio frequência e *software*, logo se pode inferir que um arranjo de antenas com características adaptativas consiste da realização do produto decorrente da união entre o eletromagnetismo, responsável por ser à base dos sistemas de comunicações, e o

processamento digital de sinais, responsável por atribuir características de “inteligência” as antenas [1] [17].

Em função do uso de recursos adaptativos no sistema de comunicação, tornou-se necessário o uso de uma variável com base na localização espacial para se aumentar a eficiência do sistema. Assim, a idéia do uso de filtragem espacial para redução da interferência (SFIR – *Spatial Filtering for Interference Reduction*), consistirá no uso de um arranjo de antenas para a geração de lóbulos adaptativos somente nas direções desejadas, e simultaneamente anular os sinais considerados interferentes (Figura 3.13). O uso de filtragem espacial no receptor fica evidente por causa da origem dos sinais serem geralmente originados de localizações diferentes, logo esta separação espacial será utilizada para distinguir o sinal de interesse, terminal móvel, daqueles considerados indesejáveis [12].

Com isso, o sinal do terminal móvel será recebido com uma potência maior em função da redução da interferência e do ruído. Contudo, essa estratégia não representa um aumento na eficiência espectral do sistema, já que não há mudança na forma em que é realizado o acesso múltiplo, porém torna-se possível a reutilização de frequências a distâncias menores, acarretando no aumento da capacidade de tráfego na rede [16].

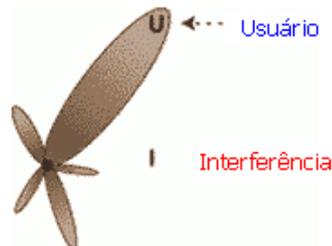


Figura 3.13 - Resultado esperado após o uso do filtro espacial.

No UMTS, os usuários são separados por código. Devido a não-ortogonalidade entre os códigos no receptor, usuários diferentes interferirão entre si. Isto é comumente conhecido como interferência de múltiplo acesso (MAI), e o seu resultado é uma redução da capacidade da rede. Uma redução da interferência fornecida pelo uso de antenas inteligentes resultará no aumento da capacidade e qualidade na rede.

3.6 Aplicações em Sistemas de Comunicações Móveis

Em sistemas de comunicações móveis, a capacidade e o desempenho ficam geralmente limitados por fatores como o desvanecimento por multipercursos e a interferência co-canal. No desvanecimento por multipercursos o sinal chega ao receptor em instantes de tempos diferentes em função da reflexão que o sinal sofre no ambiente de propagação e a interferência co-canal limita o reuso da frequência. Como alternativa para este problema veremos algumas características que acabam resultando em benefícios das antenas inteligentes para o sistema de comunicação móvel.

3.6.1 Redução do Delay Spread e Multipath Fading

Devido o sinal sofrer o efeito do desvanecimento por multipercursos, onde o sinal desejado chega ao receptor de diferentes direções em função da diversidade de caminhos que o sinal faz entre o emissor e o receptor, causando assim uma recepção em instantes de tempo distintos do mesmo sinal. O espalhamento no domínio do tempo é chamado de *Delay Spread* (Figura 3.14). Atrasos significativos do espalhamento podem causar uma forte interferência intersimbólica, sendo necessário utilizar como alternativa um equalizador de canal [6].

Utilizando antenas inteligentes na transmissão, a filtragem espacial da antena atuaria direcionando o seu sinal somente na direção desejada, reduzindo assim as reflexões que o sinal sofre durante o percurso entre o emissor e o receptor, ajudando a reduzir os efeitos do desvanecimento no ambiente de propagação e conseqüentemente do *delay spread*. Na recepção, o arranjo de antenas atuaria compensando esse efeito através da combinação de diversidade dos sinais recebidos de forma a se obter um único sinal de maior potência, e o filtro espacial atuaria cancelando os sinais considerados interferentes através da formação de valores nulos [16] [17].

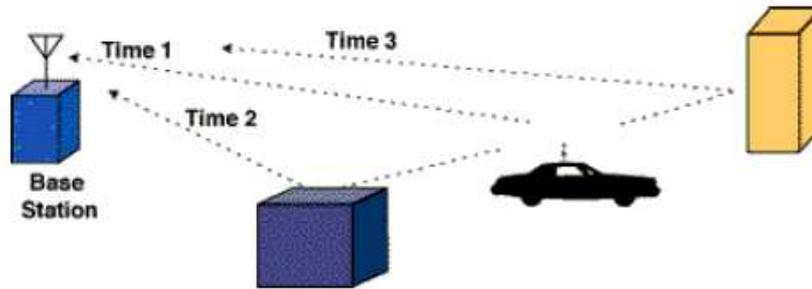


Figura 3.14 - Cenário do *delay spread*.

3.6.2 Diagramas Adaptativos

A combinação de arranjos de antenas possibilita obter com mais precisão a localização do terminal móvel, com o objetivo de se gerar diagramas mais diretivos. Cada diagrama de radiação possui uma área de cobertura dentro da célula, logo é possível afirmar que esta área de cobertura representa uma célula co-canal com as mesmas frequências. Comparando com o modelo tradicional, a posição dos diagramas de radiação é fixa (Figura 3.15 (a)), ao contrário do modelo adaptativo que permite gerar diagramas de acordo com a necessidade do sistema, e cobrindo áreas específicas dentro da célula [14] [16].

Assim, em sistemas inteligentes num futuro próximo será possível para o diagrama de radiação acompanhar o deslocamento do terminal móvel (Figura 3.15 (b)), resultando em uma potência de transmissão mais diretiva e com *handovers* entre lóbulos ocorrendo de acordo com a necessidade do sistema em atender um usuário ou grupo de usuários [14] [16].

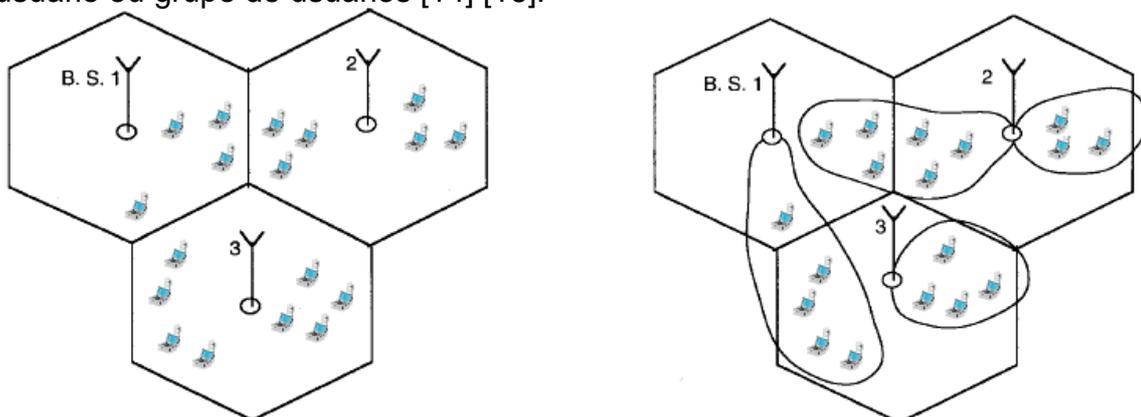


Figura 3.15 - Forma tradicional de cobrir uma célula em (a) e forma adaptativa em (b).

3.6.3 Redução da Interferência Co-Canal

Se o nível de interferência co-canal pode ser reduzido, então será possível reduzir a distância entre as células co-canais a tamanhos menores de clusters, ocasionando em um maior reuso da frequência. Esta redução só será possível com o uso do filtro espacial, para produzir um diagrama de radiação na direção do sinal de interesse e simultaneamente inserir valores nulos na direção de fontes interferentes [14], necessitando apenas de informações como a posição do usuário de interesse para que os diagramas possam acomodar os terminais móveis com maior precisão. Esta capacidade de direcionar mais em uma direção do que em outras resulta na redução da interferência para áreas onde a antena não está cobrindo com sua radiação (Figura 3.16) [17].

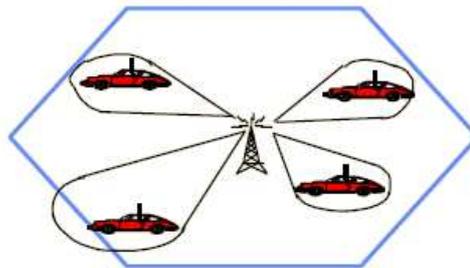


Figura 3.16 - Diferentes lóbulos atendendo usuários distintos.

3.6.4 Redução das Operações de Handovers

Como forma de melhorar a capacidade e cobertura de uma rede celular com grande tráfego, as células mais congestionadas são reduzidas para células menores (*Cell Splitting*), para permitir o aumento do fator de reutilização da frequência. Por usar um arranjo de antenas para aumentar a capacidade de uma célula, o número de handovers requerido pode realmente ser reduzido, bastando para isso que cada lóbulo adaptativo consiga acompanhar o deslocamento do terminal móvel (*Beam Tracks*). Nenhuma operação de *handover* será necessária, a menos que ocorra o chaveamento entre os lóbulos do arranjo de antenas para acomodar o usuário, pois a mudança de lóbulos indicará uma mudança de canal [16] [17].

3.6.5 Redução da Potência Transmitida

Em função da característica da antena inteligente de irradiar o sinal somente nas direções desejadas, ao contrário do modelo convencional (exemplo: antenas omnidirecionais), que irradiam o seu sinal em todas as direções, desperdiçando potência para aquelas regiões onde não há usuários e até ajudando a aumento o nível de interferência dentro do sistema. Portanto, será necessário menos poder de radiação por parte da antena em atender um usuário, essa redução de potência transmitida implicará em uma redução da interferência para com os outros usuários do sistema [16].

3.6.6 Segurança

Pela capacidade das antenas inteligentes em criarem lóbulos bem direcionais, tornando viável para o sistema conhecer com maior precisão a localização do terminal móvel, possibilitando que o sistema torne-se mais seguro. Já que, para que este seja violado o interceptador deverá estar localizado na mesma posição angular que terminal móvel para poder receber o sinal da antena transmissora, o que acaba sendo algo pouco realizável [13] [14].

3.6.7 Redução da BER

Como mencionado anteriormente, as antenas inteligentes possuem a capacidade de reduzir a interferência co-canal e os efeitos do desvanecimento por multipercursos, resultando em um aumento na SIR e conseqüentemente na melhora da qualidade do sinal recebido pelo usuário em decorrência da redução da taxa de erro de bits (BER - *Bit Error Ratio*) [17].

3.6.8 Redução da Probabilidade de Outage

Consiste na probabilidade de um usuário não poder acessar um serviço em função de condições em que o sinal recebido sofre, por exemplo, influência de

ruídos e interferências resultando em um sinal abaixo de um determinado parâmetro utilizado como medidor de qualidade dentro do sistema. Esta situação pode resultar em cancelamentos de chamadas e a inviabilidade de prestar serviços aos usuários, dentre as várias possibilidades de conduzir a uma anormalidade no sistema, o aumento da BER pode resultar no aumento da probabilidade de *outage*. O uso de antenas inteligentes contribui para a redução da BER em função da redução da interferência co-canal, possibilitando que se reduza a probabilidade de outage [4].

3.6.9 Compatibilidade

Esta tecnologia pode ser aplicada a diversas técnicas de múltiplo acesso, tais como: TDMA, FDMA e CDMA. Além de ser compatível com praticamente qualquer método de modulação e largura de banda ou faixa de frequências [13].

3.6.10 Aumento da Capacidade do Sistema

Em função da redução da interferência co-canal e das componentes do desvanecimento, o sistema pode então reusar a frequência, logo mais usuário poderão utilizar o mesmo espectro de frequência, ao mesmo tempo em que a capacidade do sistema aumentará de forma proporcional [14].

4. Análise de Interferências e Alocação de Recursos Utilizando Antenas Inteligentes

As estratégias de alocação dinâmica de canais são mecanismos bastante úteis e eficientes no momento de se realizar a alocação de canais e recursos em um slot de tempo no frame do UTRA-TDD e também na supressão da interferência inter-celular. Muitas das estratégias desenvolvidas para o DCA tentam resolver o problema da interferência de forma indireta através de algoritmos que trabalham para descobrir a melhor combinação para a alocação de usuários dentro do sistema, ou em outras palavras, estes algoritmos desenvolvem combinações específicas para controlar os níveis de interferência para reduzir seus efeitos no processo de distribuição de canais [18].

A intensidade do nível de interferência torna-se mais evidente quando há slots cruzados devido o aparecimento de dois tipos de interferência inter-celular, o que resulta em um cenário com condições desfavoráveis para o processo de alocação em função da complexidade adicional necessária por parte dos algoritmos RRM na gestão de recursos. A presença de slots cruzados reduz o desempenho das estratégias de alocação dinâmica de canais exigindo assim um esforço a mais de alguns algoritmos, como por exemplo, o controle de potência, controle de admissão e o controle de congestionamento.

Como estes algoritmos estão diretamente relacionados com a capacidade global do sistema será perceptível uma redução na qualidade do sinal, ocasionando problemas como a desconexão de usuários, atrasos nas transmissões, aumento no tempo de espera na admissão de novos usuários, etc. Estes problemas são menos difíceis de controlar no caso do *uplink* puro e *downlink* puro [18].

Neste capítulo será feita a análise de uma estratégia de alocação de recursos bastante eficiente na redução da interferência inter-celular. Esta estratégia utiliza conceitos do funcionamento das antenas inteligentes na estação base, como a capacidade de criar diagramas de radiação adaptativos e de neutralizar sinais provenientes de direções que não a do sinal de interesse, propiciando assim um alto ganho em uma determinada direção.

Os tipos de interferência inter-celular presentes no sistema UTRA-TDD usando antenas omnidirecionais na estação base podem ser observadas na tabela 4.1 [18].

Uplink Puro	$\sum_{UE} I_{UE \rightarrow BS_i} + N_0$
Downlink Puro	$\sum_{BS} I_{BS \rightarrow UE_i} + N_0$
Uplink (Slot cruzado)	$\left(\sum_{UE} I_{UE \rightarrow BS_i} \right) + \sum_{BS} I_{BS \rightarrow BS_i} + N_0$
Downlink (Slot cruzado)	$\left(\sum_{BS} I_{BS \rightarrow UE_i} \right) + \sum_{UE} I_{UE \rightarrow UE_i} + N_0$

Tabela 4.1 - Tipos de interferências no UTRA-TDD usando antenas omnidirecionais.

De acordo com as Figura 4.1 será feita uma análise do uso de antenas inteligentes somente na estação base, nesta análise será adotado o conceito de antenas inteligentes como sendo ideais [18].

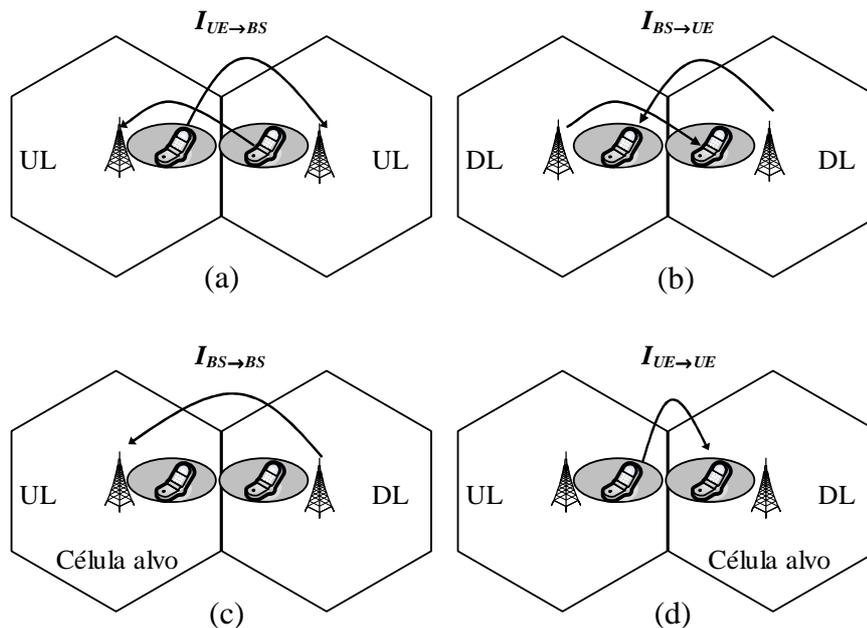


Figura 4.1 - Cenário de interferência inter-celular com antenas inteligentes na estação base, (a) Uplink puro (b) Downlink puro (c) Uplink com slot cruzado (d) Downlink com slot cruzado.

Os cenários de interferência presentes nas células da Figura 4.1 serviram de exemplo para uma análise de cálculo de interferências, agora considerando que em

um dado slot de tempo os diagramas de radiação gerados pela antena inteligente não serão direcionados de forma mútua, conforme a análise feita na Figura 4.2 [18].

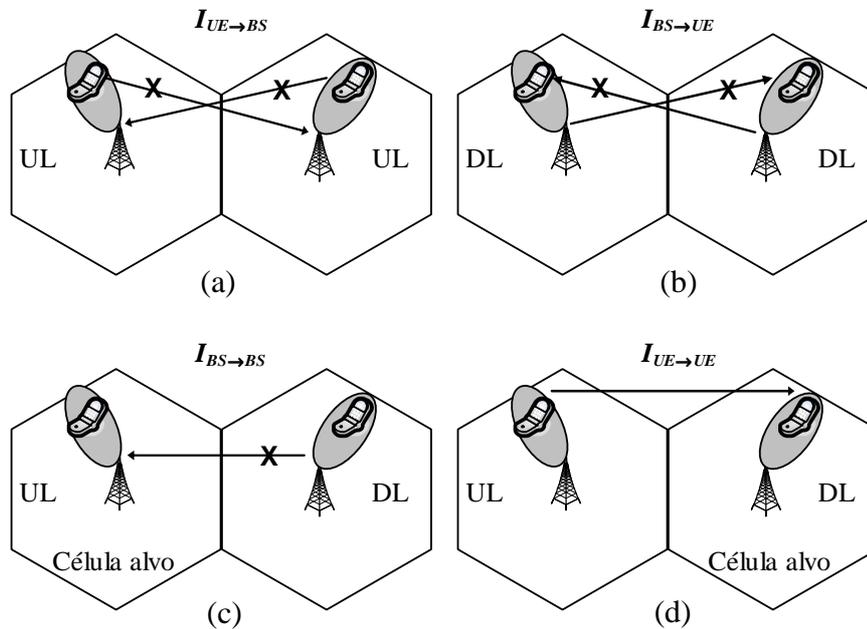


Figura 4.2 - Cenário de interferência inter-celular com antenas inteligentes na estação base, (a) Uplink puro (b) Downlink puro (c) Uplink com slot cruzado (d) Downlink com slot cruzado.

Considerando que uma antena poderá estar sendo utilizada para transmissão ou recepção, nesse caso teremos um ganho equivalente para ambos os casos, será possível fazer uma análise distinta para os casos de *Uplink* puro, *Downlink* puro e slot cruzado.

- **Uplink Puro**

Observando a Figura 4.1 (a) é possível ver que a interferência do equipamento do usuário para a estação base ($I_{UE \rightarrow BS}$) está presente, agora assumindo o cenário da Figura 4.2 (a), este tipo de interferência é eliminado, pois a antena está realizando o cancelamento do sinal a partir de valores nulos atribuídos na direção do sinal considerado interferente ($I_{UE \rightarrow BS}$).

- **Downlink Puro**

Na Figura 4.1 (b) é possível ver unicamente a interferência da estação base para o equipamento do usuário ($I_{BS \rightarrow UE}$), agora assumindo o cenário da Figura 4.2 (b), este tipo de interferência também é eliminado, pois a antena esta realizando o cancelamento do sinal a partir de valores nulos atribuídos na direção do sinal considerado interferente ($I_{BS \rightarrow UE}$).

- **Slot Cruzado**

No slot cruzado a interferência ocorre devido a usuários e/ou a estações base, analisando a Figura 4.2 (c) a interferência da estação para a outra estação base ($I_{BS \rightarrow BS}$), é eliminada a partir das características funcionais já citados anteriormente das antenas inteligentes. No caso da interferência entre usuários de células distintas ($I_{UE \rightarrow UE}$), é a única que continua atuando no cenário mais que poderia ser resolvido se na análise fosse adotado o uso de antenas inteligentes no equipamento do usuário, porém para realização prática ainda não é possível fazer este tipo de análise e também por este trabalho se limitar apenas ao funcionamento conceitual das antenas inteligentes na estação base.

A interferência entre usuários de células distintas ($I_{UE \rightarrow UE}$) apresenta como pior caso quando os usuários de células adjacentes estão próximos da borda. Analisando um ambiente multicelular é possível presenciar algumas células vizinhas apresentarem slot cruzado na mesma direção que a célula alvo, onde as interferências do tipo e também serão eliminadas. A partir destas análises a Tabela 4.1 passa a ser vista conforme a tabela 4.2 já com reduções expressivas nos parâmetros necessários para o cálculo da interferência, haja visto que o uso de antenas inteligentes na estação base propiciou uma melhoria a partir da eliminação de alguns casos de interferência [18].

Uplink Puro	N_0
Downlink Puro	N_0
Uplink (Slot cruzado)	N_0
Downlink (Slot cruzado)	$\sum_{UE} I_{UE \rightarrow UE} + N_0$

Tabela 4.2 - Novo cenário de interferência inter-celular com antenas inteligentes na estação base conforme a Figura 4.2.

4.1 Estratégia de Alocação Dinâmica de Canal Autônoma

A análise desta estratégia de DCA requer que as células estejam setorizadas, para que seja possível identificar o setor onde os usuários estão presentes. A seguir será descrito os passos necessários para a realização desta estratégia.

Identificação do Setor (x_{ij}): Será a identificação do setor, onde o índice i representa o setor da célula alvo, direcionado para o setor da célula adjacente representado pelo índice j .

Diferença no Perfil de Tráfego (DTP_{ij}): Este parâmetro é utilizado como medidor da diferença de tráfego entre a célula alvo e as células adjacentes. Este valor pode ser obtido a partir da equação (4.1).

$$DTP_{ij} = SP_i - SP_{j|j=1...6} \quad (4.1)$$

Onde o parâmetro SP_i e o SP_j correspondem ao *Switching Point* da célula alvo e das células adjacentes respectivamente. Utilizando-se células hexagonais e um cluster de células igual a sete, ou seja, seis células ao redor da célula alvo. Será utilizado neste trabalho a utilização de um único SP separando os slots de *UL* e *DL*. O valor do DTP_{ij} será um valor inteiro positivo, negativo ou zero, a informação obtida pode ser interpretada da seguinte forma.

$DTP_{ij} > 0$: Significa que o número de slots de tempo de downlink que a célula j tem a mais que a célula i .

$DTP_{ij} = 0$: Significa que a célula i e j possuem o mesmo perfil de tráfego, pois apresentam a mesma distribuição de *UL* e *DL*.

$DTP_{ij} < 0$: Significa que o número de slots de tempo de downlink que a célula i tem a mais que a célula j .

O próximo passo será classificar o DTP_{ij} em ordem decrescente, após isso cada DTP_{ij} será associado com um nível de prioridade, o maior valor obtido no

DTP_{ij} estará associado com o menor nível de prioridade e assim sucessivamente para os demais valores (Figura 4.3). Cada identificação de um setor x_{ij} , ficará associado com um DTP_{ij} , logo este setor receberá o mesmo nível de prioridade atribuído a este mesmo DTP_{ij} . Assim os usuários presentes em um setor x_{ij} também receberão o mesmo nível de prioridade.

Para uma boa visualização sugere-se a construção de uma tabela, pois o algoritmo DCA alocará os usuários no slot de tempo conforme a tabela sugerida. O processo de alocação inicia-se a partir do slot mais afastado do SP , onde os usuários serão classificados como de baixo nível de prioridade (L) no UL e com alto nível de prioridade (H) no DL . O objetivo deste algoritmo é o de tentar melhorar o desempenho quanto a interferências no pior caso, ou seja, slot cruzado. Apesar dos cenários vistos na Figura 4.1 onde alguns casos não puderam ser evitados, o critério mais básico utilizado como forma de alocação é baseado da posição dos usuários. Tornando viável o uso desta estratégia, em função da análise realizada na Figura 4.2, em que o problema de alocação fica reduzido a um problema de duas células adjacente [18].

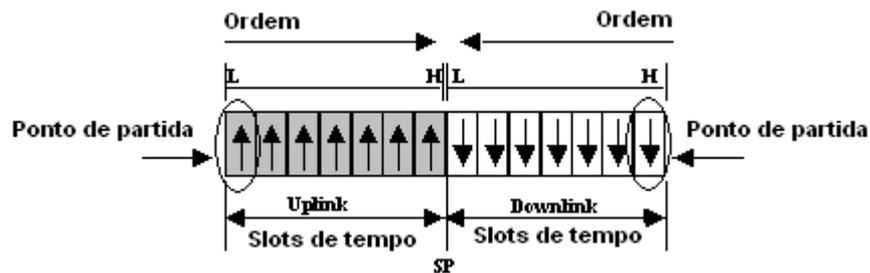


Figura 4.3 - Processo de alocação no frame.

5. Descrição do Ambiente de Simulação e Resultados

Como forma de validação da estratégia e do algoritmo DCA adotado no capítulo anterior, foi desenvolvido um simulador utilizando a linguagem de programação Java, neste ambiente é utilizado um cenário com um cluster size de sete células (Figura 5.1), onde a célula central foi destinada como sendo a célula alvo. Todas as células apresentam setores com ângulos de 60 graus, resultando em seis setores.

Sabendo-se que no UTRA-TDD a unidade básica de recursos (RU) do sistema é composta por um slot e um código sendo possível apenas 16 códigos por slot de um total de 12 slots utilizados para esta simulação. Foram utilizados serviços do tipo conversacional e web browsing, onde cada tipo de aplicação requer 8 RUs e 4 RUs respectivamente, e apenas um SP é utilizado. O perfil de tráfego de todas as células pode ser visto na tabela 5.1 e os parâmetros adotados na simulação podem ser vistos na tabela 5.2.

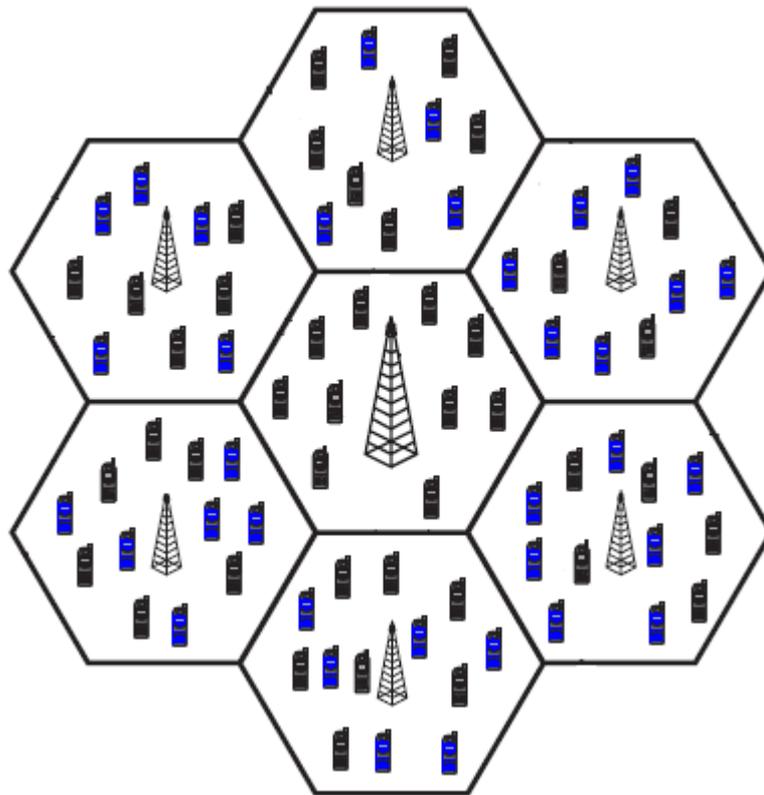


Figura 5.1 - Cluster size com sete células.

	UEs	SP
Célula alvo	12 UEs Conversacionais	6
Célula 1	10 UEs Conversacionais 08 UEs Web Browsing	5
Célula 2	08 UEs Conversacionais 16 UEs Web Browsing	4
Célula 3	06 UEs Conversacionais 24 UEs Web Browsing	3
Célula 4	04 UEs Conversacionais 32 UEs Web Browsing	2
Célula 5	06 UEs Conversacionais 24 UEs Web Browsing	3
Célula 6	08 UEs Conversacionais 16 UEs Web Browsing	4

Tabela 5.1 - Perfil de tráfego adotado.

5.1 Resultados

Inicialmente foi feito o procedimento de alocação dos usuários no frame a partir da estratégia *Far-Close*, onde o procedimento adotado é o de alocar primeiramente os usuários que se encontram mais afastados da estação base, lembrando que os usuários que estão utilizando serviços conversacionais possuem prioridade de alocação dos RUs em relação aos serviços web browsing. Na Figura 5.2 pode ser visualizado o procedimento de alocação adotado para o caso da célula alvo onde são utilizados apenas serviços conversacionais, logo será alocado apenas dois usuários por slot, iniciando do sentido da extremidade ao centro do frame.

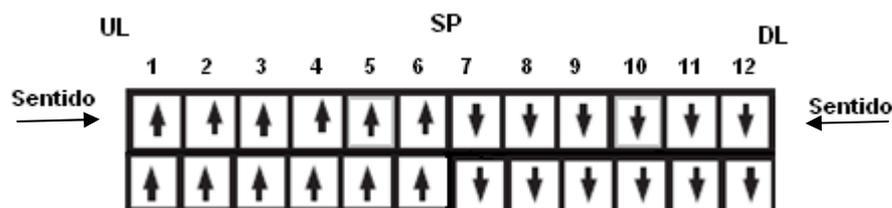


Figura 5.2 - Estrutura do frame para a célula alvo.

As Figuras 5.3 a 5.10 apresentam alguns dos resultados obtidos durante as simulações realizadas usando a estratégia citada anteriormente. Onde é possível comprovar a eficácia da estratégia de alocação e o uso de antenas inteligentes na

redução da potência. Observando os gráficos das Figuras 5.3 e 5.4 é possível notar uma redução na potência para o UE1 que se encontra alocado no slot 1, onde neste cenário o UE1 esteve posicionado próximo da borda da célula e os outros usuários das células adjacentes em setores próximos da célula alvo. A potência ajustada no cenário com antenas omnidirecionais ficou em 20,4912dBm e a potência ajusta no cenário com antenas inteligentes foi reduzida para 20,0767dBm, enquanto que a potência inicial em ambos os casos ficou em 19,0777dBm.

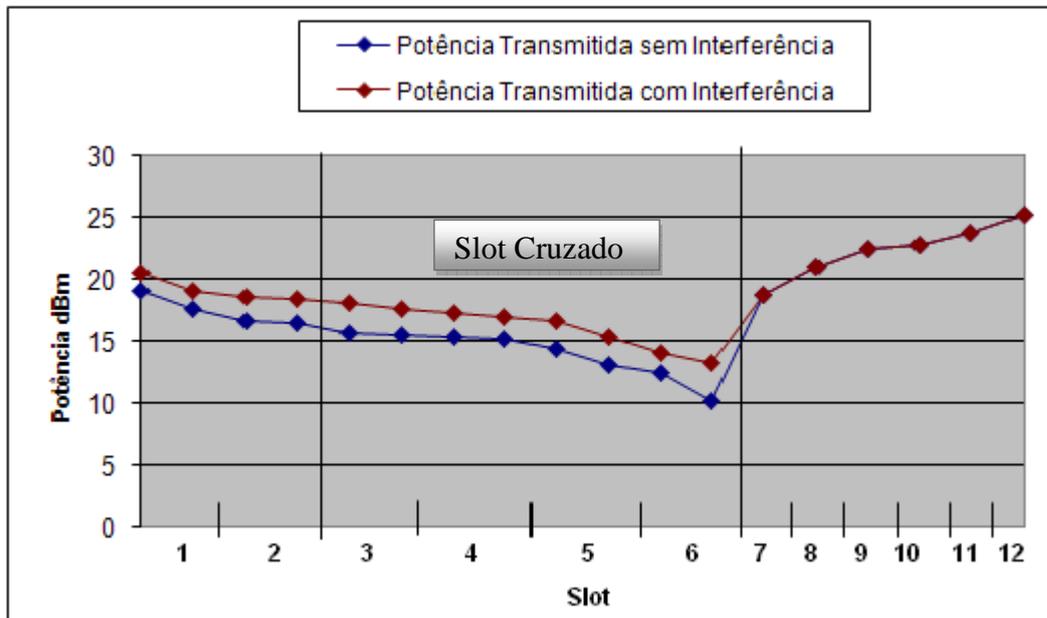


Figura 5.3 - Resultado da simulação com antenas omnidirecionais.

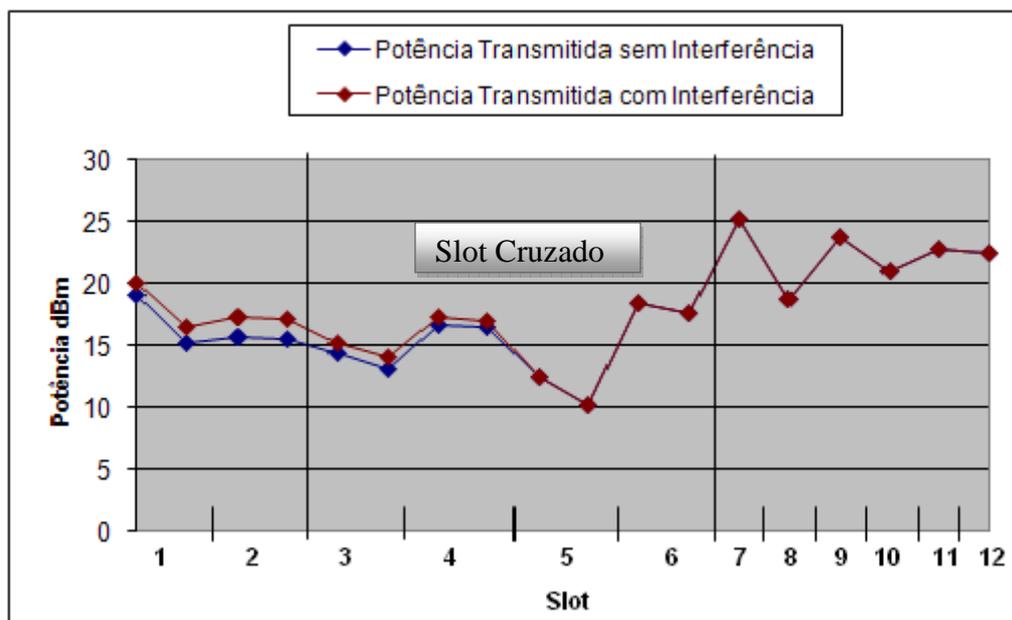


Figura 5.4 - Resultado da simulação com antenas inteligentes.

Agora fazendo um pequeno deslocamento do UE1 em direção a estação base e um afastamento dos outros usuários das células adjacentes, é possível observar no gráfico da Figura 5.5 que houve uma redução na potência inicial e na potência ajustada, o que também confirma a eficácia da estratégia observando o gráfico da Figura 5.6.

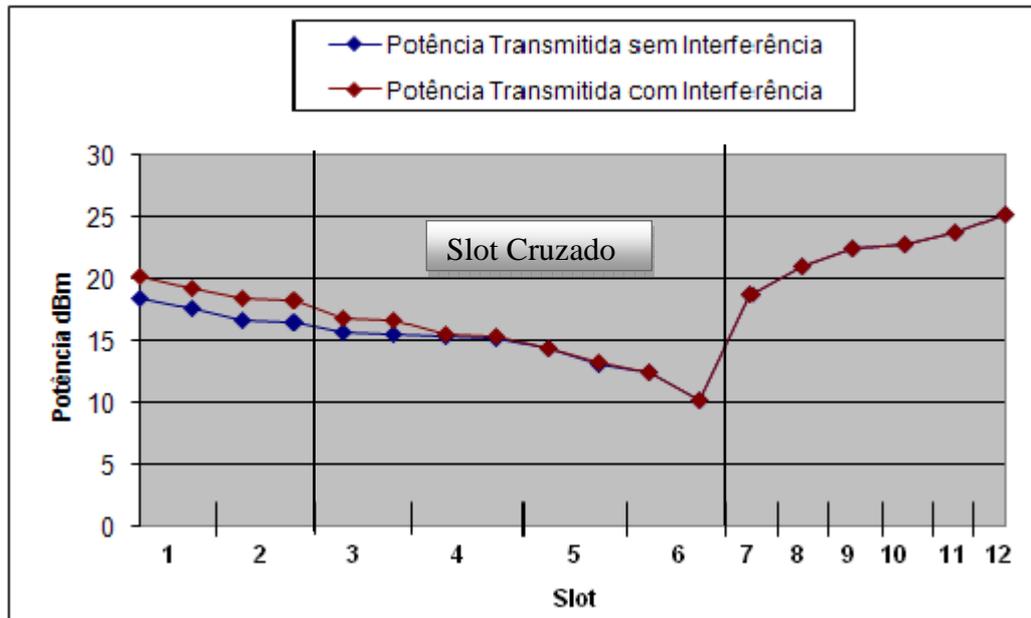


Figura 5.5 – Resultado da simulação com antenas omnidirecionais.

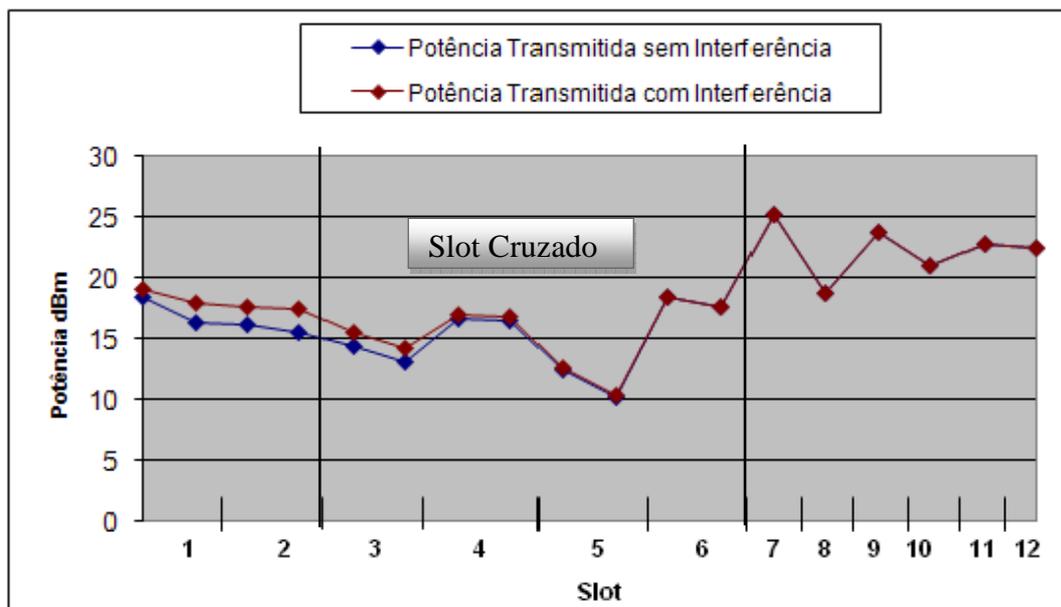


Figura 5.6 – Resultado da simulação com antenas inteligentes.

Agora fazendo uma análise com a mudança de posição de todos os usuários da célula alvo e mantendo a posição do UE1 como sendo a mais afastada, é possível notar que o efeito é similar aos demais gráficos com antena omnidirecionais (Figura 5.7). Feito isso a análise passa a ser feita com antenas inteligentes (Figura 5.8), onde o resultado obtido também foi o de redução da potência transmitida do usuário UE1 mantendo sua posição como fixa neste cenário.

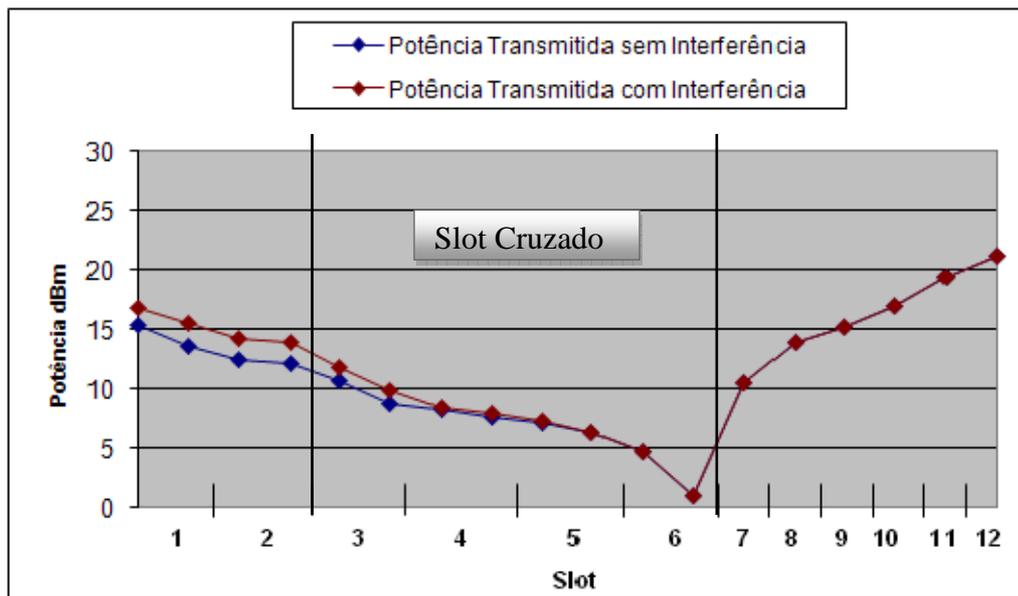


Figura 5.7 - Resultado da simulação com antenas omnidirecionais.

A potência ajustada pela antena no cenário com antenas omnidirecionais ficou em 16,9764dBm, enquanto que no cenário com antenas inteligentes ficou em 16,8483dBm e a potência inicial para ambos os casos esteve em 15,3380dBm, análise feita somente para o UE1 que está alocado no slot 1.

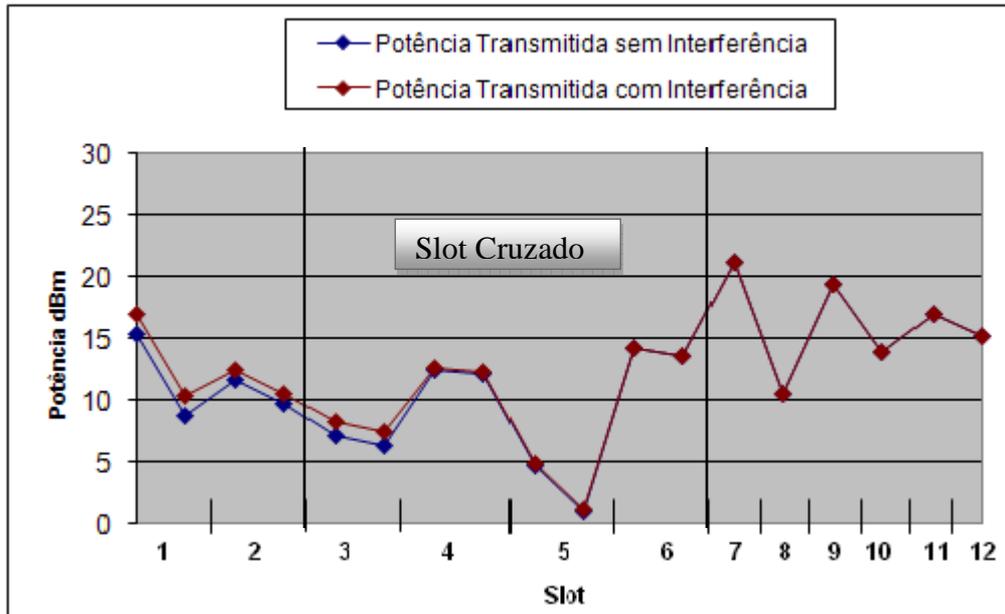


Figura 5.8 - Resultado da simulação com antenas inteligentes.

Agora com um cenário onde os usuários das células adjacentes foram posicionados de forma bem distribuída nos setores das células. A análise será feita utilizando novamente o usuário UE1 que se encontra mais afastado da estação base e alocado no slot 1 do frame, com a utilização de antenas omnidirecionais na estação base (Figura 5.9) e no equipamento do usuário, a potência inicial transmitida pelo UE1 ficou em 18,4777dBm e a potência ajusta pela antena ficou em 19,4912dBm. Na segunda parte da simulação utilizando antenas inteligentes (Figura 5.10) este mesmo usuário transmitindo com a mesma potência inicial obteve como potência ajustada o valor de 18,9767dBm.

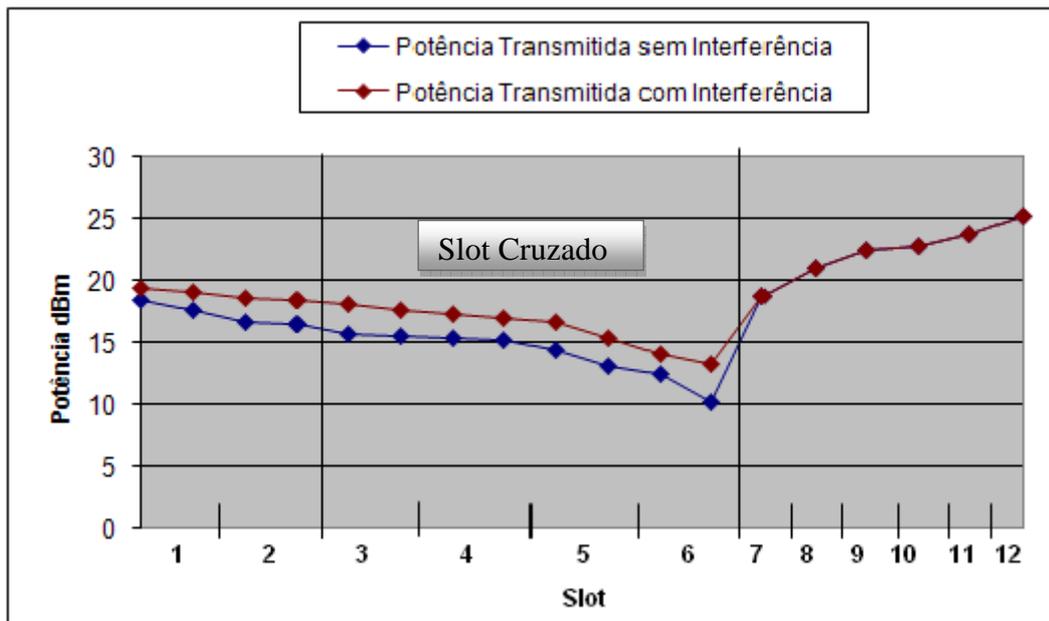


Figura 5.9 Resultado da simulação com antenas omnidirecionais.

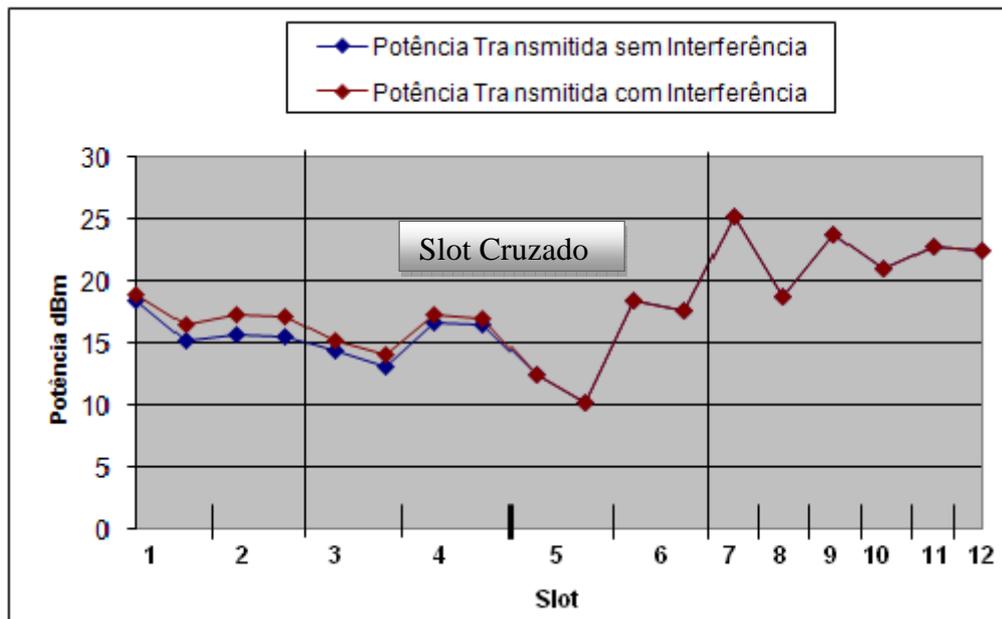


Figura 5.10 - Resultado da simulação com antenas inteligentes.

Conforme observado nos resultados é possível constatar a eficácia da estratégia de alocação do DCA utilizada, pois houve uma redução considerável na potência ajustada pela antena, o que resulta em um menor nível de interferência possibilitando um melhor aproveitamento do espectro por parte dos algoritmos RRM. Principalmente do algoritmo de controle de potência que não encontrará muita dificuldade no ajuste de potência por aproveitar os benefícios comprovados do uso

de antenas inteligentes na redução da interferência, resultando no final um sinal de qualidade ao usuário.

Parâmetros da BS	
Raio da célula	600 m
Potência máxima transmitida	43dBm
Ruído	-99dBm
Parâmetros do UE	
Potência máxima transmitida	21dBm
Potência mínima transmitida	-44dBm
Ruído	-103.2dBm
Parâmetros de QoS	
$SIR_{UL, DL}$	-7,53dB
$SIR_{UL, DL}$ (webbrowsing)	-10,54dB
Modelos de Propagação	
UE \leftrightarrow BS	$L(d) = 128.1 + 37.6 \log d(km) + 10dB$
UE \leftrightarrow UE	$L(d) = 128.1 + 37.6 \log d(km) + 12dB$
BS \leftrightarrow BS	$L(d) = 38.25 + 20 \log d(m) + 12dB$

Tabela 5.2 - Parâmetros da simulação.

6. Conclusão e Trabalhos Futuros

Este trabalho através de simulações analisou a eficácia do uso de antenas inteligentes na redução da interferência aliado a uma estratégia do algoritmo DCA na alocação de recursos no sistema UTRA-TDD. As antenas inteligentes através do filtro espacial apresentam características bastante interessantes para o sistema de comunicação móvel, como a capacidade de neutralizar sinais indesejáveis e de criar diagramas adaptativos, permitindo que interferências do tipo: de usuários em estações base, de estações base em usuários e entre estações base pudessem ser eliminadas.

Estas antenas também podem se beneficiar de problemas como o de multipercursos, onde através do uso arranjo do receptor *rake* e do filtro espacial, será possível combinar sinais de diferentes percursos e gerar um único sinal com um nível de potência bem superior. Além de auxiliar o algoritmo de controle de potência com o problema *Near-Far*, o que no final acaba contribuindo com a redução da potência empregada pelo equipamento do usuário.

O uso de antenas inteligentes para os sistemas de terceira geração é de grande importância para que a gestão de recursos não seja prejudicada pelos efeitos da interferência. A partir da análise realizada com os resultados da simulação foi comprovado que é possível reduzir o nível de potência empregada pelos terminais móveis, assim a antena inteligente contribuirá com o algoritmo de controle de potência no ajuste do nível de potência empregada pelos transmissores.

Os resultados obtidos neste trabalho foram baseados em simulações de computador, onde ficou-se limitado apenas no cálculo de potências e em teorias da eficácia das antenas inteligentes na estação base, um modelo mais preciso de simulação poderá ser obtido a partir do incremento de outros dispositivos para fins de análise durante as simulações como a filtragem espacial e o deslocamento contínuo dos RRM durante as simulações. Todo esse procedimento é para que as classes de serviços consigam atender as exigências requeridas segundo as especificações distintas de QoS exigidas.

Bibliografia

- [1] - GUERRA, Maurício Vilela. Utilização de Antenas Adaptativas em sistemas CDMA. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2001.
- [2] - SOUZA, Rodolfo Sabóia de. Controle de Potência em Sistemas de Comunicações Móveis Celulares. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2003.
- [3] - GARCIA, Luis Guilherme Uzeda. Aumentando o desempenho do enlace direto de redes UMTS FDD através de conceitos avançados de antenas – Uma Análise Sistêmica. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2006.
- [4] - J. Pérez-Romero, O.Sallent, R.Agustí, M. Díaz-Guerra, Radio Resource Management Strategies in UMTS, Ed. John Wiley & Sons, 2005.
- [5] - J. Laiho, A. Wacker and T. Novosad, Radio Network Planning and Optimisation for UMTS, John Wiley & Sons, Second Edition, 2006.
- [6] - A. J. Paulraj, D. Gesbert, C. Papadias, “Smart Antennas for Mobile Communications”, ENCYCLOPEDIA FOR ELECTRICAL ENGINEERING, JOHN WILEY PUBLISHING CO. 2000.
- [7] - R. Esmailzadeh, M. Nakagawa, TDD-CDMA for Wireless Communications, Artech House, 2003.
- [8] - CORRÊA, Rodrigo Jurema de Assis. Análise de desempenho de enlaces com modulação adaptativa aplicada a sistemas WCDMA/HSDPA. Rio de Janeiro: PUC-Rio, Departamento de Engenharia Elétrica, 2003.
- [9] - H. Holma, A. Toskala, WCDMA for UMTS, John Wiley Ltd, Third Edition, 2004.
- [10] - Osvaldo F. Alves, “Gerenciamento de Recursos de Rádio em Sistemas Celulares”. Universidade Federal de Pernambuco, 2006.

- [11] - RODRIGUES, Eduardo Jorge Brito. Um Estudo da Capacidade de sistemas 3G WCDMA usando técnicas 3.5G de expansão do enlace reverso. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2005.
- [12] - J.C. Liberti and T.S. Rappaport, Smart Antennas for Wireless Communications: 1S-95 and Third Generation CDMA applications, Prentice Hall, N.J. 1999.
- [13] - Frank B. Gross. Smart Antennas for Wireless Communications with Matlab. McGraw-Hill, 2005.
- [14] - FERNANDES, L. C. (2007). Aplicações de Antenas Adaptativas em Sistemas de Comunicações Móveis. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, Publicação PPGENE.DM-295A/07, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, DF.
- [15] - FIRETTI, V. L. (2005). Análise de Viabilidade da Aplicação de Antenas Inteligentes em Redes de Comunicações Móveis Celulares GSM DCS 1800. Dissertação de Graduação em Engenharia Elétrica, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, DF.
- [16] - J.S. Blogh, L. Hanzo. Third-generation Systems and Intelligent Wireless Networking, Smart Antennas and Adaptive Modulation. John Wiley & Sons, LTD 2002.
- [17] - L. C. Godara, “Applications of Antenna Arrays to Mobile Communications, Part I: Performance, Improvement, Feasibility, and System Considerations”, Proceedings of the IEEE, Vol. 85, No. 7, pp. 1031-1060, July 1997.
- [18] - CASTRO, Agostinho Luis da Silva. Intelligent Dynamic Channel Allocation for UTRA-TDD Systems. Tese de Doutorado, Universidade do Porto – Faculdade de Engenharia, 2004.