



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO  
EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

Décio Rennó de Mendonça Faria

**SISTEMA ELETRÔNICO DE RASTREAMENTO E  
DIRECIONAMENTO DE SINAIS PARA REDES 5G E IoT**

Itajubá  
2019

Décio Rennó de Mendonça Faria

**SISTEMA ELETRÔNICO DE RASTREAMENTO E  
DIRECIONAMENTO DE SINAIS PARA REDES 5G E IoT**

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Ciências em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Danilo Henrique Spadoti

Área de concentração: Microeletrônica

Itajubá  
2019

Décio Rennó de Mendonça Faria

## **SISTEMA ELETRÔNICO DE RASTREAMENTO E DIRECIONAMENTO DE SINAIS PARA REDES 5G E IoT**

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Ciências em Engenharia Elétrica.

Área de concentração: Microeletrônica

---

Prof. Dr. Mateus Augusto Faustino Chaib Junqueira - UNIFEI

---

Prof<sup>a</sup>. Dr.<sup>a</sup> Fernanda Rodrigues da Silva- UNIFEI

---

Prof. Dr. Kenedy Marconi Geraldo dos Santos - IFBA

---

Prof. Dr. Renan Alves dos Santos - UFU

---

Prof. Dr. Danilo Henrique Spadoti (Orientador) - UNIFEI

Itajubá, 24 de Junho de 2019

## **AGRADECIMENTOS**

Aos professores do curso, especialmente ao Professor Dr. Danilo Henrique Spadoti pela confiança, pelas orientações, pelo otimismo e principalmente pela grande atenção dada não só a mim como a todos que o procuram. Ao Professor Dr. José Antônio Justino Ribeiro pelos valorosos ensinamentos passados na graduação e pelo entusiasmo e alegria com que compartilha seus conhecimentos através de seus livros e pessoalmente sempre que indagado. À equipe da UNIFEI em especial ao IESTI e a todos os colegas e amigos que de forma direta ou indireta contribuíram com este trabalho. À minha família, em especial à minha querida filha Micaela.

## RESUMO

Atualmente, o sistema móvel de comunicação caminha para um novo salto tecnológico, denominado de quinta geração (5G). Neste sistema cada usuário terá sua própria rede em banda larga e novas tecnologias facilitarão a conexão máquina para máquina (M2M – *Machine to Machine*) dando suporte a chamada Internet das Coisas (IoT – *Internet of Things*) onde dispositivos eletrônicos poderão trocar mensagens entre si ou com o homem. Para atingir esse objetivo a nova rede, necessariamente, deverá ser ultradensa com inúmeras estações atendendo áreas que antes eram atendidas por uma única estação. A complexidade dos sistemas, principalmente do sistema de controle, será bem maior que o atual. No caso específico de uma mudança de célula é de grande valia estimar para qual célula a unidade móvel se desloca, porém esta informação não está disponível atualmente para a Unidade de Controle chamada de Entidade de Gerenciamento da Mobilidade (MME - *Mobility Management Entity*).

Este trabalho propõe a utilização de um sistema digital de localização que converte o ângulo de chegada do sinal (AoA – *Angle of Arrival*) em dados para serem utilizados como estimativa de mudança de célula. Atualmente, a MME envia sinais de busca para todas as estações rádio-base na vizinhança da estação móvel para determinar para qual célula o móvel se deslocou, esse processo leva a uma sobrecarga da rede de dados na proximidade do usuário final. No novo sistema proposto neste trabalho, a determinação do ângulo de chegada permite estimar para onde a unidade móvel se desloca, não sendo necessária a ativação de todas as estações na vizinhança da estação atual. Esta proposta é inovadora sendo esta a principal contribuição deste trabalho. Adicionalmente, com a informação do ângulo de chegada do sinal, a estação rádio-base pode direcionar os sinais para a estação móvel possibilitando, assim, uma área de cobertura definida por software. O desenvolvimento teórico da técnica do ângulo de chegada foi confirmado nos testes realizados no Laboratório de Telecomunicações da UNIFEI. Os resultados experimentais obtidos foram muito próximos aos resultados analíticos. Por fim, um circuito eletrônico foi desenvolvido apresentando em tempo real o ângulo de chegada do sinal, demonstrando que o multipercurso não inviabiliza o uso deste sistema em ambientes internos.

**Palavras chave:** Comunicação móvel 5G, Antenas de feixe controlado, Internet das coisas, Radiolocalização, Circuito eletrônico de radiolocalização.

## ABSTRACT

Currently, the mobile communication system is headed for a new technological leap called fifth generation (5G). In this system each user will have their own broadband network and new technologies will facilitate the machine to machine connection (M2M) supporting the Internet of Things (IoT) concept where electronic devices can exchange messages with each other or with the man. To reach this goal, the new network must necessarily be ultradense with numerous stations serving areas that previously were served by a single station. The complexity of systems, especially the control system, will be much greater than the current one. In the specific case of a cell change it is of great value to estimate to which cell the mobile unit moves, but this information is not currently available to the Control Unit called the Mobility Management Entity (MME).

This work proposes the use of a digital localization system that converts the angle of arrival of the signal (AoA) into data to be used as estimation of cell change. Currently, the MME sends search signals to all base stations in the vicinity of the mobile station to determine to which cell the mobile has moved, this process leads to an overload of the data network in the vicinity of the end user. In the system proposed in this work, determining the angle of arrival allows estimating where the mobile unit moves, and it is not necessary to activate all stations in the vicinity of the current station. This proposal is innovative and this is the main contribution of this work. Additionally, with the angle of arrival signal information, the base station may direct the signals to the mobile station thereby enabling a software defined coverage area. The theoretical development of the angle of arrival technique was confirmed in the tests carried out at the Telecommunication Laboratory of UNIFEI. The experimental results obtained were very close to the analytical results. Finally, an electronic circuit was developed showing in real time the angle of arrival of the signal, demonstrating that the multipath does not invalidate the use of this system in internal environments.

**Keywords:** 5G mobile communication, Controlled beam antennas, Internet of Things, Radio direction finder, Electronic circuit for radiolocation.

## LISTA DAS FIGURAS

Figura 1.1 – Áreas de rastreamento e suas células.	2
Figura 1.2 – Envio de mensagens da MME ( <i>Paging</i> ) para localizar a estação mais próxima	4
Figura 1.3 – Envio de mensagens da MME ( <i>Paging</i> ) somente para a estação mais provável	5
Figura 2.1 – Divisão dos canais no sistema AMPS.	9
Figura 2.2 – União das organizações para criação da tecnologia móvel celular 3G.	11
Figura 2.3 – Capacidade do <i>Backhaul</i> em função do número de estações base em uma região	12
Figura 3.1 – Modulador GMSK utilizando modulador em quadratura	14
Figura 3.2 – Introdução dos novos módulos na criação do UMTS sobre a rede GSM/GPRS	16
Figura 3.3 – Divisão da MSC em duas partes: MSC-S e CS-MGW	17
Figura 3.4 – Interligação entre as eNBs e EPC (MME/S-GW)	20
Figura 3.5 – Alocação de blocos para transmissão dos dados	21
Figura 3.6 – Mapa da evolução da telefonia móvel celular até a Release 9	22
Figura 3.7 – Agregação de portadoras para aumento da taxa de dados	23
Figura 3.8 – Multiplexação espacial utilizando antena MIMO 2x2	23
Figura 3.9 – Transmissão em <i>downlink</i> no modo <i>Joint Transmission</i>	24
Figura 3.10 – Transmissão em <i>downlink</i> no modo <i>Dynamic Point Selection</i>	25
Figura 3.11 – Previsão dos trabalhos da 3GPP	26
Figura 4.1 – Sistema de localização LCS na arquitetura GSM e UMTS	28
Figura 4.2 – Fluxo de dados do sistema de localização LCS	29
Figura 4.3 – Princípio de funcionamento do E-OTD e OTDOA nas redes GSM e LTE	31
Figura 4.4 – Determinação da distância pelo tempo de chegada	32
Figura 4.5 – Determinação da posição utilizando TOA e triangulação	33
Figura 4.6 – Determinação da posição da estação móvel utilizando o AoA em duas estações	34
Figura 4.7 – Determinação da distância entre o satélite e a estação móvel no sistema GPS	38
Figura 4.8 – Princípio básico de funcionamento do radar	39
Figura 5.1 – Solicitação enviada às estações pela MME para localização da estação móvel	40
Figura 5.2 – Comunicação entre as estações eNodeB e MME	41
Figura 5.3 – Principais dispositivos envolvidos em uma mudança de célula Inter LTE	42
Figura 5.4 – Mudança de célula com tecnologias diferentes	43
Figura 5.5 – Controle de direcionamento individual de estação móvel	44
Figura 5.6 – Controle de localização e direcionamento completo da estação base	44
Figura 5.7 – Diagrama de irradiação controlado por software	45
Figura 5.8 – Conjunto de antenas e transmissores produzindo feixes de sinais controlados	46
Figura 5.9 – Envio dos dados por comutação por circuito e comutação por pacotes	47

Figura 5.10 – Interligação entre as eNBs e EPC (MME/S-GW)	48
Figura 5.11 – Mudança de célula utilizando interface X2	49
Figura 5.12 – Mudança de célula utilizando os recursos da MME	50
Figura 5.13 – Mudança de célula em uma área com alta densidade de estações base	50
Figura 5.14 – Direção estimada da estação móvel considerando pequeno erro de multipercuso	51
Figura 5.15 – Três sinais sendo recebidos caracterizando multipercuso	52
Figura 5.16 – Sinal em visada direta bloqueado	53
Figura 6.1 – Antenas dipolos utilizadas para recepção dos sinais	54
Figura 6.2 – Posição da estação móvel em relação às antenas do sistema	56
Figura 6.3 – Montagem das antenas e equipamentos do laboratório	58
Figura 6.4 – Tela do osciloscópio recebendo sinais através de uma antena dipolo	59
Figura 6.5 – Antena dipolo com a resistência instalada	59
Figura 6.6 – Resistência apresentada pelo conjunto antena/resistor	60
Figura 6.7 – Eliminação do ruído com a aplicação da técnica do resistor	61
Figura 6.8 – Tela do osciloscópio com os sinais das antenas 1 e 2 (móvel à 60°)	62
Figura 6.9 – Tela do osciloscópio com os sinais das antenas 1 e 2 (móvel à 90°)	62
Figura 7.1 – Diagrama em blocos do sistema proposto	63
Figura 7.2 – Circuito de entrada do amplificador de baixo ruído	64
Figura 7.3 – Circuito amplificador de 20dB em cascata	65
Figura 7.4 – Circuito amplificador de 30dB utilizado como amplificador de entrada	65
Figura 7.5 – Circuito comparador de fase AD8302 da Analog Devices	66
Figura 7.6 – Circuito utilizado na conversão analógico digital com conexão USB	66
Figura 7.7 – Tela do programa desenvolvido para determinação do ângulo de chegada do sinal	67
Figura 7.8 – Diagrama de fluxo de dados do programa desenvolvido	68
Figura 7.9 – Tensão de saída do circuito integrado AD8302 em função do ângulo de chegada	68
Figura 7.10 – Sistema em funcionamento no laboratório	69
Figura 7.11– Vista frontal do conjunto montado	69
Figura 7.12 – Erros relacionados ao processo de conversão	70

## LISTA DAS SIGLAS

**16QAM** – Sistema de modulação em fase e quadratura com constelação de 16 símbolos.

**3G** – Nome dado aos sistemas móveis de comunicação de terceira geração.

**3GPP** – *Third Generation Partnership Project*, união de sete organizações geradoras de padronizações (ARIB, ATIS, CCSA, ETSI, TSDSI, TTA, TTC), com o objetivo de padronizar o sistema de telefonia móvel celular.

**8PSK** – Sistema de modulação em fase utilizada pela tecnologia EDGE.

**AAS** – *Active Antenna System*, conjunto de antenas e transceptores que permitem a direcionamento do sinal tanto na vertical como na horizontal.

**AMC** – *Adaptative Modulation and Coding*, sistema de controle de tipo de modulação e taxa de transmissão utilizada no HSDPA.

**AMPS** – *Advanced Mobile Phone System*, primeiro sistema de telefonia móvel celular implantado em Chicago nos Estados Unidos no ano de 1978 pela Illinois Bell e AT&T.

**AOA** – *Angle of Arrival*, sistema de localização baseado no ângulo de chegada do sinal.

**AUC** – *Authentication Center*, parte do sistema de controle do GSM responsável pela autenticação do equipamento e usuário na rede.

**Backhaul** – Canal de comunicação de uma rede de dados nas proximidades do usuário final.

**BSC** – *Base Station Control*, unidade de controle de estações rádio base (BTS) utilizada nas estações GSM da segunda geração da telefonia móvel celular.

**BSS** – *Base Station Subsystem*, conjunto formado pelas estações rádio base e controladora do sistema utilizado nas estações GSM da segunda geração da telefonia móvel celular.

**BTS** – *Base Transceiver Station*, unidade de rádio do sistema GSM responsável pela conexão do sistema com a estação móvel.

**Célula** – Nome dado a área de cobertura de uma estação rádio base na telefônica móvel celular.

**CDMA** – *Code Division Multiple Access*, sistema de multiplexação baseado no espalhamento espectral e divisão por códigos.

**CN** – *Core Network*, abreviatura utilizada na documentação do 3GPP para designar os dispositivos e protocolos de controle e conexões centrais da rede.

**CoMP** – *Coordinated Multi Point*, conjunto de transmissores e receptores em locais separados que fazem parte da mesma estação eNodeB.

**CRS** – *Cell Specific Reference Signal*, sinal de referência que permite a avaliação da influência do meio de transmissão no sinal transmitido.

**CS** – *Circuit Switch*, abreviatura utilizada na documentação do 3GPP para designar uma conexão orientada por chaveamento (alocação de canal).

**CS-MGW** – *Circuit Switch Media Gateway*, parte do sistema GSM responsável pelo tratamento dos sinais de transporte da estação móvel. Foi resultado da divisão do MSC definido no Release 4 do 3GPP.

**D-AMPS** – *Digital AMPS*, sistema digital de telefonia móvel celular implantado na década de 90 tendo como base o aproveitamento da estrutura já implantada do sistema AMPS.

**Downlink** – Nome dado ao sistema de transmissão de dados no sentido da estação base para a estação móvel.

**E-DCH** – *Enhanced Dedicated Channel*, canal de transmissão de rádio de curta duração utilizado na tecnologia HSUPA.

**EDGE** – *Enhanced Data Rates for Global Evolution*, tecnologia implantada no sistema GSM/GPRS considerada como a geração 2,75 da telefonia móvel celular que introduziu a modulação 8PSK ao sistema.

**EIR** – *Equipment Identity Register*, é um banco de dados que armazena informações do IMEI dos equipamentos no sistema GSM.

**EM** – Estação Móvel, designação dada a todo dispositivo móvel ligado via rádio à uma rede de telefonia móvel celular.

**eNodeB** – *evolved NodeB*, parte de uma rede com tecnologia LTE responsável pela comunicação via rádio da rede com as estações móveis.

**EPC** – *Evolved Packet Core*, núcleo do sistema LTE utilizado na telefonia móvel celular de quarta geração.

**ERB** – Estação Rádio-base, designação dada ao conjunto de equipamentos que fornecem acesso via rádio à estação móvel.

**E-UTRAN** – *Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network*, conjunto de todos os dispositivos de uma rede móvel portátil na rede LTE.

**FCC** – *Federal Communications Commission*, órgão do governo dos Estados Unidos responsável pela regulação do serviço de telecomunicações daquele país.

**FDD** – *Frequency Division Duplex*, técnica de transmissão caracterizada por usar uma faixa de frequência para transmissão e outra faixa de frequência para recepção.

**Fentocélula** – Nome dado às estações rádio-base de cobertura reduzida com capacidade de atendimento de um grande número de usuários com taxa de transmissão elevada.

**GERAN** – *GSM EDGE Radio Access Network*, conjunto de todos os dispositivos de uma rede móvel portátil na rede GSM com tecnologia EDGE.

**GGSN** – *Gateway GPRS Support Node*, parte do sistema GPRS que possibilita a conexão de dados da rede móvel com a rede Internet ou Intranets.

**GMSC** – *Gateway Mobile Switching Centre*, central responsável pela conexão da rede UMTS com outras redes fixas ou móveis em uma rede UMTS.

**GPRS** – *General Packet Radio Service*, serviço de envio de dados por pacotes definido pela *European Telecommunication Standards Institute* e utilizado nas redes GSM.

**GPS** – *Global Positioning System*, sistema baseado em satélites que permite a localização de uma estação receptora com grande precisão.

**GSM** – Originalmente “*Groupe Spécial Mobile*”, grupo criado na década de 1980 para padronização da telefonia móvel, hoje GSM significa *Global System for Mobile Communication*, ou sistema global de comunicação móvel.

**GMSK** – *Gaussian Minimum Shift Keying*, uma variação da modulação PSK (*Phase Shift Modulation*) com a divisão do tempo do TDMA (*Time Division Multiple Access*).

**GMLC** – *Gateway Mobile Location Centre*, porta de acesso utilizada no sistema de localização de estações móveis.

**Handover** – Mudança de célula em uma rede de telefonia móvel.

**Home eNodeB** – Nome alternativo para Femtocélula.

**HLR** – *Home Location Register*, é um banco de dados que armazena informações do SIM card no sistema GSM.

**HSCSD** - *High Speed Circuit Switched Data*, sistema de transmissão de dados implantado no sistema GSM da chamada Segunda Geração e Meia da telefonia móvel celular.

**HSDPA** – *High Speed Downlink Packet Access*, técnica de transmissão utilizada no sentido da estação base para a estação móvel baseada no compartilhamento do canal.

**IoT** – *Internet of Things*, tecnologia de comunicação entre dispositivos que comunicam entre si ou com o homem através da rede internet.

**IP** – *Internet Protocol*, protocolo de comunicação utilizado na rede mundial de computadores.

**IPv6** – *Internet Protocol version 6*, versão mais moderna do protocolo IP.

**ITU-T** – *International Telecommunication Union*, agência especializada das Nações Unidas responsável pela área de comunicações e tecnologia da informação.

**IMT-2000** – *International Mobile Telecommunication 2000*, projeto criado pela ITU-T com o objetivo de desenvolver o sistema de terceira geração da telefonia móvel celular.

**HLR** – *Home Location Register*, banco de dados com as informações do usuário do sistema que são utilizados pelas estações MSC.

**LCS** – *Location Service*, sistema de localização criado para o GSM com o objetivo inicial de

oferecer apoio em situações de emergência e posteriormente para uso comercial de oferta de serviços de restaurantes, postos de combustíveis entre outros.

**Link adaptativo** – Esquema de transmissão que muda o tipo de modulação adaptando-se as condições da conexão via rádio.

**LMU** – *Location Measurement Unit*, unidade da UMTS responsável pela localização de uma estação móvel dentro da rede.

**LTE** – *Long Term Evolution*, padrão de transmissão de dados em banda larga que marcou o início da quarta geração da telefonia móvel celular.

**M2M** – *Machine to Machine*, sistema de comunicação a curta ou longa distância que permite a troca de informações entre máquinas.

**MAP** – *Mobile Application Part*, núcleo principal de controle do sistema UMTS implantado no início da terceira geração da telefonia móvel celular.

**MBMS** – *Multimedia Broadcast Multicast Service*, serviço de transmissão de dados ponto para multiponto para transmissão de dados multimídia.

**MIMO** – *Multiple input Multiplo Output antenna*, antena com múltiplas entradas e saídas.

**MME** – *Mobility Management Entity*, unidade do sistema de telefonia móvel celular responsável pelo monitoramento e controle de acesso à rede.

**MS** – *Mobile Station*, nome dado à unidade móvel no sistema GSM.

**MSC** – *Mobile Switching Centre*, central responsável por receber as chamadas, enviar mensagens e manter a informação da localização da estação móvel em uma rede UMTS.

**MSC-S** – *Mobile Switching Centre Server*, parte do sistema GSM responsável pelo tratamento dos sinais de controle da conexão com a estação móvel. Foi resultado da divisão do MSC definido no Release 4 do 3GPP.

**MTS** – *Mobile Telephone System*, primeiro serviço de telefonia móvel, criado em 1947 tendo sua capacidade máxima explorada na década de 50.

**NMT 450** – Sistema telefonia móvel celular de primeira geração similar ao sistema AMPS implantado na Dinamarca, Finlândia, Noruega e Suécia.

**NTT** – Nippon Telegraphand Telephone, sistema de telefonia móvel celular de primeira geração implantado no Japão no ano de 1979.

**Node B** – Também chamado de *Base Station* ou Estação Base é a estação de rádio que possibilita a conexão da estação móvel com a rede UMTS.

**OFDMA** – *Orthogonal Frequency Division Multiplexing Access*, técnica de modulação utilizada na tecnologia LTE que resulta em um ganho de largura de espectro de até 50%.

**Paging** – Sinal enviado às estações base com o objetivo de localizar uma estação móvel.

**PCU** – *Packet Control Unit*, módulo responsável pelo roteamento dos dados para o sistema GSM ou para o Sistema GPRS nas redes com tecnologia GSM/GPRS.

**P-GW** – *Packet Data Network Gateway*, módulo que provê a conexão de dados da unidade móvel com a rede de dados externa.

**PSK** – *Phase Shift Modulation*, sistema de modulação em fase.

**QPSK** – *Quadrature Phase Shift Modulation* Sistema de modulação em fase e quadratura com constelação de 4 símbolos.

**RAN** – *Radio Access Network*, parte da rede que proporciona via rádio a comunicação da estação móvel com o sistema.

**RAT** – *Radio Access Technology*, método de conexão via rádio utilizada por uma determinada tecnologia para comunicação entre estação base e estação móvel.

**Relay Nodes** – Estações base de baixa potência que possibilitam o aumento da capacidade ou aumento da cobertura de uma célula.

**RNC** – *Radio Network Controller*, central de controle de Nodos B (Estações Base) em uma rede UMTS. Todas as Nodos B estão conectadas às centrais RNC.

**RNS** – *Radio Network Subsystem*, bloco formado por uma RNC e uma ou várias estações Node B em uma rede UMTS.

**RSSI** – *Received Signal Strength Indication*, valor representativo do nível de sinal de rádio frequência na entrada do receptor.

**S1** – Interface de comunicação entre as estações base e NodeB e os níveis superiores na tecnologia LTE.

**SC-FDMA** – *Single Carrier Frequency Division Multiple Access*, técnica de modulação utilizada na tecnologia LTE que reduz o consumo de energia da unidade móvel.

**SGSN** – *Serving GPRS Support Node*, sistema responsável pelo gerenciamento da conexão da estação móvel com a rede de dados no sistema GPRS.

**S-GW** – *Serving gateway*, módulo responsável pelo roteamento de pacotes da rede vindos da MME e auxílio no processo de mudança de célula de diferentes MME.

**SIM-cards** – *Subscriber Identity Module*, circuito integrado em formato de cartão utilizado para identificar, controlar e armazenar dados na rede GSM.

**SMLC** – *Serving Mobile Location Centre*, serviço central de localização de estações móveis.

**SMS** – *Short Message Service*, serviço de mensagens curtas criado para o serviço GSM.

**STRATUM** – Nome dado à grupo de protocolos utilizado na documentação do 3GPP.

**TACS** – *Total Access Communication System*, sistema de primeira geração desenvolvido pela Motorola e implantado na Inglaterra no ano de 1985.

**TDMA** – *Time Division Multiple Access*, sistema de multiplexação baseado na divisão do tempo para o compartilhamento do canal.

**TDD** – *Time Division Duplex*, técnica de transmissão caracterizada por usar períodos de tempo diferentes para transmissão de sinais no sentido *uplink* e *downlink*.

**TOA** – *Time of Arrival*, técnica de localização baseada no tempo de chegada do sinal.

**Tracking Area** – Área de cobertura de um conjunto de estações rádio-base na telefonia móvel celular controladas por uma unidade de controle chamada MME.

**TTI** – *Transmission Time Interval*, parâmetro utilizado no UMTS relacionado ao tempo de duração da transmissão de rádio.

**UTDOA** – *Uplink Time Difference Of Arrival* – Técnica de localização baseada no tempo de chegada do sinal na estação receptora.

**Uplink** – Nome dado ao sistema de transmissão de dados no sentido da estação móvel para a estação base, também chamado de link reverso.

**UTRAN** – *Universal Terrestrial Radio Access Network*, conjunto de todos os dispositivos de uma rede móvel portátil na rede UMTS.

**UMTS** – *Universal Mobile Telecommunication System*, termo utilizado para designar o padrão 3G como evolução do sistema GSM.

**USIM-cards** – *Subscriber Identity Module*, circuito integrado em formato de cartão utilizado para identificar, controlar e armazenar dados na rede UMTS.

**VLR** – *Visitor Location Register* – Registro temporário de um assinante no sistema GSM quando este está utilizando uma estação base que não é a sua estação de origem.

**WCDMA** – *Wide Code Division Multiple Access*, sistema de transmissão em banda larga com multiplexação por divisão de código utilizado na primeira versão da telefonia móvel celular com a tecnologia 3G.

**X2** – Interface de comunicação entre estações eNodeB na tecnologia LTE.

# Sumário

<b>1 – INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1 – CONTEXTUALIZAÇÃO E MOTIVAÇÃO .....	1
1.2 – O PROBLEMA A SER ENFRENTADO .....	2
1.3 – OBJETIVOS .....	5
1.4 – ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO .....	6
1.5 – PUBLICAÇÕES .....	6
<b>2 – A EVOLUÇÃO DA COMUNICAÇÃO MÓVEL.....</b>	<b>8</b>
2.1 – INTRODUÇÃO.....	8
2.2 – O INÍCIO DA COMUNICAÇÃO MÓVEL .....	8
2.3 – A EVOLUÇÃO DOS SISTEMAS.....	10
<b>3 – O AVANÇO TECNOLÓGICO E A TECNOLOGIA ATUAL .....</b>	<b>14</b>
3.1 – A TECNOLOGIA EDGE .....	15
3.2 – RELEASE 99- UMTS.....	15
3.3 – RELEASE 4 .....	17
3.4 – RELEASE 5 - HSDPA .....	17
3.5 – RELEASE 6 - HSUPA .....	18
3.6 – RELEASE 7 - HSPA+.....	19
3.7 – RELEASE 8 – LTE .....	19
3.8 – RELEASE 9 .....	21
3.9 – RELEASE 10 – LTE <i>ADVANCED</i> .....	22
3.10 – RELEASE 11 .....	24
3.11 – RELEASE 12 .....	25
3.12 – RELEASE 13 .....	25
3.13 – RELEASE 14, 15 E 16.....	26
<b>4 – A DETERMINAÇÃO DA DIREÇÃO E LOCALIZAÇÃO.....</b>	<b>28</b>
4.1 – INTRODUÇÃO.....	28
4.2 – O SISTEMA DE LOCALIZAÇÃO NO LTE .....	31
4.3 – OUTRAS TÉCNICAS DE DIREÇÃO E LOCALIZAÇÃO.....	32
<b>5 – O SISTEMA PROPOSTO .....</b>	<b>40</b>
5.1 – INTRODUÇÃO.....	40
5.2 – O SISTEMA DE CONTROLE PROPOSTO .....	43
5.3 – A ÁREA DE COBERTURA DEFINIDA POR SOFTWARE.....	45
5.4 – A DIMINUIÇÃO DO TRÁFEGO .....	47
5.5 – ANÁLISE DO EFEITO DE MULTIPERCURSO .....	51
<b>6 – ENSAIOS LABORATORIAIS DO SISTEMA DE DIREÇÃO .....</b>	<b>54</b>
6.1 – A PREPARAÇÃO DO EXPERIMENTO .....	54

6.2 – A ELIMINAÇÃO DOS SINAIS INTERFERENTES .....	58
6.3 – OS RESULTADOS OBTIDOS .....	61
<b>7 – O CIRCUITO ELETRÔNICO DIGITAL.....</b>	<b>63</b>
7.1 – INTRODUÇÃO TEÓRICA.....	63
7.2 – O AMPLIFICADOR DE ENTRADA .....	64
7.3 – O CIRCUITO COMPARADOR DE FASE .....	65
7.4 – O CIRCUITO CONVERSOR ANALÓGICO/DIGITAL .....	66
7.5 – O SOFTWARE DE CONVERSÃO.....	67
7.6 – RESULTADOS OBTIDOS .....	70
<b>8 – CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>72</b>
<b>LISTA DE REFERÊNCIAS .....</b>	<b>74</b>

# 1 – INTRODUÇÃO

## 1.1 – Contextualização e Motivação

A telefonia móvel celular teve como objetivo principal oferecer uma comunicação móvel pessoal sem interrupção em uma grande área de cobertura. Alguns anos após a comercialização do primeiro aparelho no ano de 1983 [1], pode-se dizer que esse objetivo foi atingido. Porém, como toda nova tecnologia, um novo horizonte de possibilidades, aplicações e desafios também acompanharam esse novo conceito de comunicação móvel. O primeiro desafio foi a necessidade do aumento da capacidade do sistema para comportar um número maior de usuários. Este problema inicial foi amenizado com a digitalização da voz, criando-se a Segunda Geração (2G) da telefonia móvel celular, em meados dos anos 90 [2]. Com o sistema digitalizado, a era da transmissão de dados por parte dos usuários foi iniciada, passando a ser feita, principalmente, pelo Serviço de Mensagem Curta (SMS - *Short Message Service*). Uma evolução desse sistema é chamada Segunda Geração e Meia (2,5G), que permitiu a transmissão de dados em alta velocidade, abrindo caminho para a geração seguinte. A denominada Terceira Geração (3G) conta com uma transmissão em banda larga com Protocolo Internet (IP - *Internet Protocol*), possibilitando aplicações multimídia. Atualmente, vislumbra-se dar um novo salto em termos de tecnologia, onde máquinas e equipamentos poderão se comunicar e trocar informações automaticamente pelo conceito de Máquina para Máquina (M2M – *Machine to Machine*) [3]. Ademais, será aumentada a relação homem máquina com o avanço do conceito de Internet das Coisas (IoT - *Internet of Things*). Esses novos conceitos e aplicações requerem novas tecnologias sendo estes os principais desafios que estão sendo enfrentados no desenvolvimento da quinta geração da tecnologia móvel celular 5G [4].

Em uma rede de dados ou de voz é extremamente importante a determinação da localização de um usuário ou de um dispositivo, com um objetivo primordial de realizar a conexão ou a troca de mensagens. Dado a complexidade das redes móveis atuais, conhecer a localização do dispositivo móvel com maior precisão possibilita um melhor gerenciamento da rede em termos de Qualidade de Serviço (QoS) e Qualidade de transmissão (Qot), além de diminuir o tráfego de informação entre as estações.

Os primeiros sistemas de localização em redes móveis foram desenvolvidos com o objetivo de proporcionar mudança de células (área de cobertura de uma estação base).

Posteriormente, no Sistema Global para Comunicações Móveis (GSM - *Global System for Mobile Communication*) foi criado o Serviço de Localização (LCS - *Location Services*) com o objetivo de oferecer apoio em situações de emergência. Com a evolução dos sistemas o 3GPP (*Third Generation Partnership Project*), que é o órgão responsável pela padronização do sistema de telefonia móvel [5][6], melhorou este serviço e ampliou sua aplicação possibilitando o uso comercial desse sistema. Por meio do LCS, o usuário pode receber informações sobre serviços próximos ao local onde se encontra, como restaurantes, postos de combustíveis, entre outros. Nas redes atuais este serviço está modernizado, porém continua a ser utilizado somente para prestar ajuda em situações de emergência e oferecer serviços nas proximidades onde a estação móvel se encontra.

## 1.2 – O problema a ser enfrentado

A nova tecnologia 5G, ainda em desenvolvimento, prevê a utilização de células cada vez menores. A 3GPP em sua Release 9 prevê o uso de estações rádio-base com áreas de cobertura reduzidas, chamadas de Femtocélulas [7]. Estas estações têm como objetivo atender um grande número de usuários com uma taxa de transmissão elevada permitindo tráfego multimídia em uma área pequena. Neste cenário, o número de estações móveis em deslocamento que inevitavelmente necessitam de mudança de célula é muito elevado. No sistema atual, quando uma estação móvel muda de célula a Entidade de Gerenciamento Móvel (MME - *Mobile Management Entity*) responsável pelo controle de acesso à rede precisa determinar para qual célula a unidade móvel se deslocou e fazer a mudança. Como ilustração a Fig. 1.1 mostra duas regiões controladas por duas unidades MME. As áreas são chamadas de Área de Rastreamento (TA – *Tracking Area*) subdivididas em células [8].

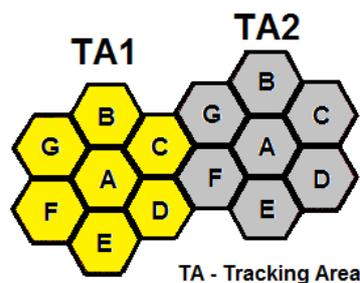


Fig. 1.1 – Áreas de rastreamento e suas células.

Neste exemplo, a Área de Rastreamento TA1 bem como a Área de Rastreamento TA2 estão subdivididas em 7 células identificadas pelas letras de A à G. No modelo de célula, as células adjacentes não utilizam os mesmos canais. Se uma estação móvel que se encontra na célula A se desloca, saindo da área de cobertura da mesma, a MME deve enviar uma solicitação à todas as células vizinhas que irão “interrogar”, ou seja, enviar um sinal para verificar se a estação móvel se encontra em sua área. Neste exemplo, todas as estações vizinhas (B,C,D,E,F e G) receberão essa solicitação enviada através de um canal de controle ou pacote de dados na rede de acesso próximo ao usuário final (*backhaul*) e irão ativar seus transmissores para localizar a estação móvel. Uma vez localizada a estação móvel, a MME atualiza sua lista de estações móveis para a nova situação. Para a nova geração da telefonia móvel celular 5G, que necessita gerenciar uma alta taxa de dados, mudança de célula 5G para célula com tecnologias anteriores como 4G e 3G, uso de redes ultra densas entre outras, um sistema de controle como o descrito acima torna-se bastante complexo [9].

Além do problema do gerenciamento, a área de cobertura de células geograficamente bem distribuídas não é de fácil implantação. Existem locais com necessidades de atendimento de grandes áreas abertas e ao mesmo tempo atendimento de pequenas áreas com grande concentração de pessoas. Havendo alta densidade de estações rádio-bases e elevado número de usuários em movimento é imprescindível o ajuste do lóbulo dos sistemas irradiantes para cobrir estas áreas desejadas sem interferir nas células adjacentes. Neste cenário, a nova geração da telefonia móvel celular 5G, se comparada à geração atual, impõe um desafio ainda maior exigindo o desenvolvimento de novas tecnologias que, se não solucionarem, pelo menos amenizem os problemas relacionados ao gerenciamento e ao delineamento adequado dos sinais nas áreas de cobertura.

A partir da quarta geração da telefonia móvel celular marcada pela tecnologia LTE (*Long Term Evolution*) a estação base passou a ser chamada de eNodeB (*evolved NodeB*). As estações eNodeB são controladas pelas entidades MME que, entre outras funções monitoram a possível mudança de célula que deve ocorrer quando uma estação móvel se distancia da estação eNodeB atual e se aproxima de uma outra estação eNodeB que passará a fornecer a nova conexão [10]. No sistema atual a MME envia uma solicitação de busca (*Paging*) à todas as estações próximas com o objetivo de determinar a posição da estação móvel e a nova estação eNodeB que irá se conectar com ela. A Fig. 1.2 ilustra esse procedimento.

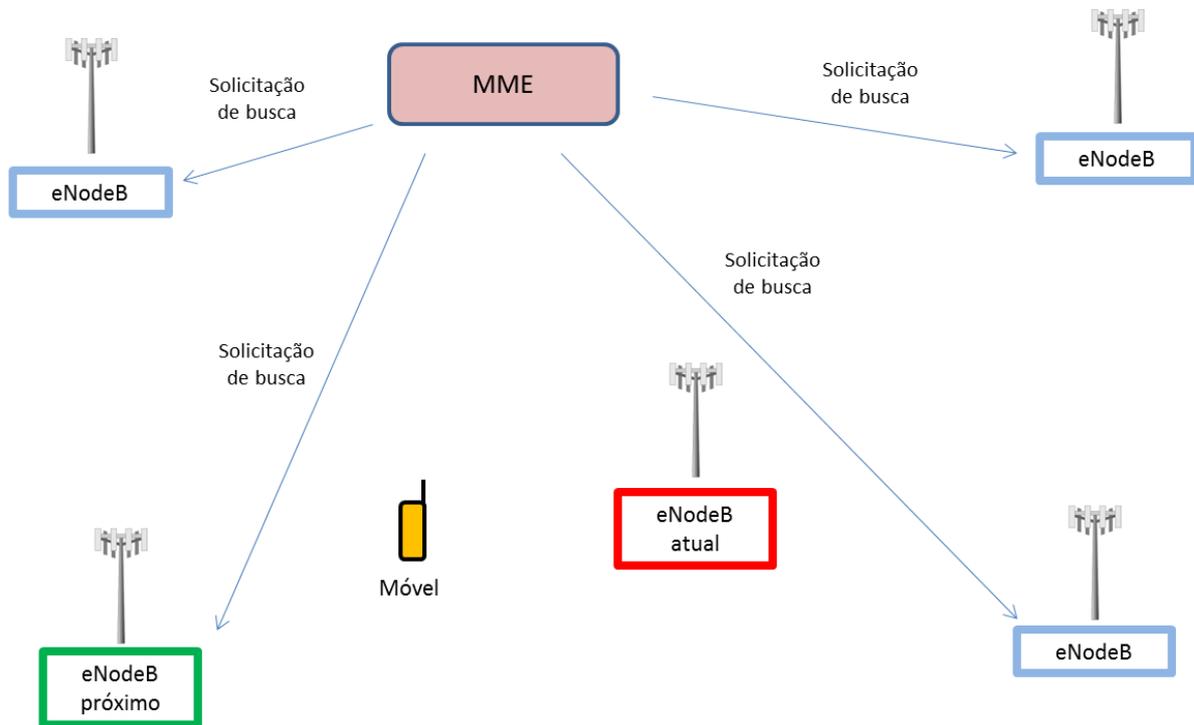


Fig. 1.2 – Envio de mensagens da MME (*Paging*) para localizar a estação mais próxima.

No sistema proposto por este trabalho a direção dos sinais da estação móvel que chegam ao eNodeB são convertidos em sinais digitais e esta informação é enviada à MME que envia a solicitação de busca somente para estações daquela direção. O método proposto para o sistema de localização neste trabalho é o do ângulo de chegada (AoA - *Angle of Arrival*). O envio do sinal de sinalização somente para algumas estações (não para todas) reduz o tráfego na rede mais próxima do usuário (*Backhaul*) bem como elimina a transmissão de sinais e utilização de recursos de forma desnecessária. A utilização do ângulo de chegada do sinal pela MME determinando a direção do móvel bem como o envio do sinal de *paging* destinado somente as estações nesta direção é algo inovador e uma contribuição deste trabalho. A Fig. 1.3 ilustra o procedimento proposto.

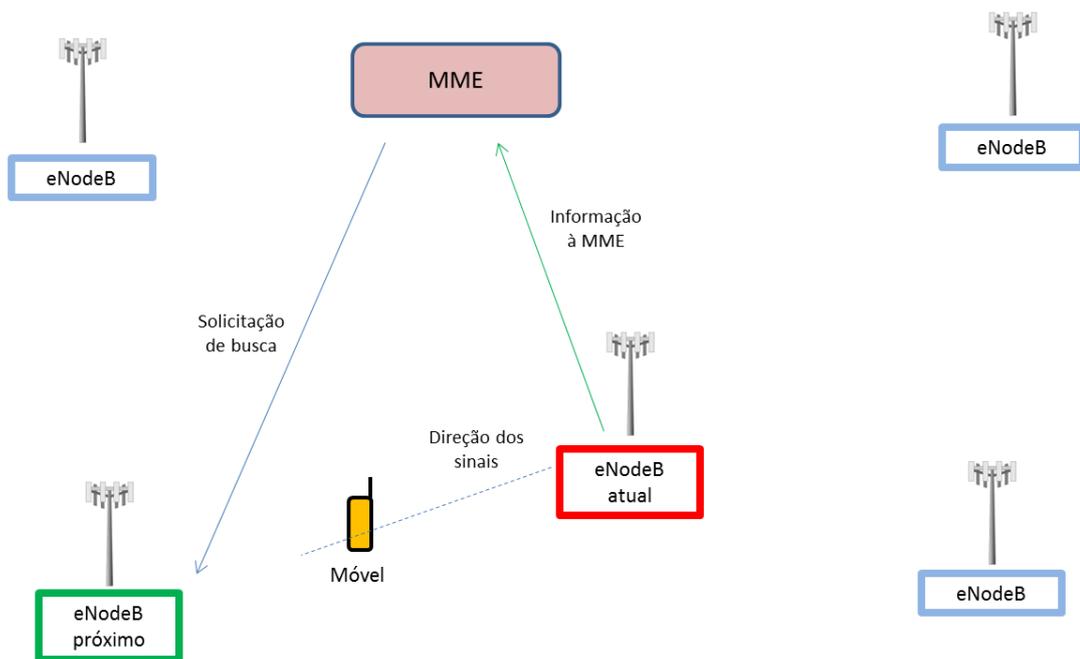


Fig. 1.3 – Envio de mensagens da MME (*Paging*) somente para a estação mais provável.

Além deste avanço no sistema de gerenciamento, a determinação do ângulo de chegada possibilita a utilização de sistemas irradiantes reconfiguráveis nas estações eNodeB que podem direcionar a transmissão na direção da estação móvel. Este recurso diminui a densidade de potência irradiada na região uma vez que o sinal passa a ser direcionado possibilitando, também, a implementação de uma área de cobertura definida por software, pois é possível estabelecer níveis de potência irradiada diferentes para cada direção.

Atualmente algumas operadoras de telefonia móvel estão implantando a tecnologia 5G de forma bastante limitada. A AT&T e a Verizon nos Estados Unidos lançaram suas redes móveis 5G cobrindo pequenas regiões. A operadora KT na Coreia do Sul também anunciou a implantação de uma rede 5G. Todos esses sistemas estão em fase inicial de testes. Um sistema de gerenciamento com uma grande densidade de estações ainda não foi implantado [11].

### 1.3 – Objetivos

O objetivo principal deste trabalho é desenvolver um sistema eletrônico digital de rastreamento e direcionamento de sinais em redes 5G e IoT, baseado na técnica do ângulo de chegada, visando a redução de tráfego na rede próxima ao usuário final (*backhaul*). Essa redução do tráfego deve ocorrer sem prejuízo ao sistema já implantado, ou seja, compatível com este, sendo esperado um aumento da eficiência da rede como um todo. A técnica proposta

por este trabalho é inovadora podendo ser utilizada em sistemas complexos como a rede de telefonia móvel celular 5G bem como em sistemas mais simples como redes WIFI entre outros.

## 1.4 – Organização do trabalho

O Capítulo 1 deste trabalho apresenta a motivação e o problema a ser enfrentado, bem como os objetivos a serem atingidos e as publicações e patente solicitada. O Capítulo 2 descreve de forma sucinta a evolução dos sistemas móveis de comunicação dando enfoque a evolução histórica do sistema de telefonia móvel. O Capítulo 3 apresenta o avanço tecnológico destacando as características técnicas mais relevantes de cada tecnologia relacionadas a este trabalho. O Capítulo 4 descreve o funcionamento dos sistemas de localização já implantados e de algumas técnicas de determinação de direção do sinal e localização que podem ser utilizadas. O Capítulo 5 é o principal deste trabalho, onde é exposto e analisado o funcionamento do sistema de determinação de direção de sinal, sua participação no processo de gerenciamento de rede e a contribuição deste trabalho. O Capítulo 6 apresenta os ensaios laboratoriais que comprovam a viabilidade do uso da técnica do ângulo de chegada como mecanismo de determinação da direção da estação móvel. O Capítulo 7 apresenta um circuito digital de baixo custo aplicando a técnica de ângulo de chegada que pode ser implementado em tecnologias menos complexas como WIFI, RFID, *Drones*, e outros. O Capítulo 8 finaliza este trabalho apresentando as conclusões e possíveis trabalhos futuros.

## 1.5 – Publicações

Relacionado a este trabalho está o artigo “*A System to improve the management of 5G and IoT Networks by determining the Mobile Position*” dos autores, D. R. M. Faria, R. A. Santos, K. M. G. Santos e D. H. Spadoti publicado pelo *Journal of Microwaves, optoelectronics and Electromagnetic Application* (JMOe) em sua edição volume 18, número 2 de 2019. O artigo descreve o sistema de rastreamento de estações móveis utilizado pelas atuais redes de telefonia móvel celular e propõe a utilização de um sistema de determinação da direção do sinal da estação móvel como informação auxiliar à MME. O artigo apresenta conceitos teóricos da técnica de determinação da direção do sinal por ângulo de chegada bem

como os resultados obtidos em laboratório. Em sua conclusão apresenta a grande correlação entre a diferença de fase das correntes induzidas em duas antenas utilizadas na recepção de uma estação base e a direção da estação móvel comprovando a parte teórica apresentada e desenvolvida no artigo.

Para a realização de alguns experimentos relacionados a este trabalho, algumas dificuldades técnicas tiveram que ser superadas. Uma das maiores dificuldades práticas encontradas foi a presença de sinais de rádio frequência indesejáveis durante as medições realizadas com osciloscópio que apresentava sinais distorcidos. A solução encontrada foi a utilização de um resistor em paralelo com a antena que, aproveitando dos efeitos da variação da impedância desta para diferentes frequências, reduz os ruídos nas medições. A técnica utilizada gerou um artigo intitulado “*A Simple Methodology to Eliminate Noise in the Antennas Dipoles Measurements*” dos autores D. R. M. Faria, K. M. G Santos, R. A. dos Santos e D. H. Spadoti, aceito e apresentado no simpósio *International Applied Computational Electromagnetics Society (ACES) Symposium 2019* em Miami, Florida nos Estados Unidos.

Também relacionado a este trabalho está em processo de análise para publicação uma patente com o título “Sistema de Localização de Estação Móvel e Direcionamento do Sinal” de propriedade do autor deste trabalho registrado no INPI – Instituto Nacional de Propriedade Industrial sob o número BR2020180750823. Esta patente descreve a utilização da informação da direção dos sinais das estações móveis como método auxiliar na predição da mudança de células nas futuras redes 5G bem como o direcionamento do sinal baseado nesta informação definindo um conceito de área de cobertura de célula configurável por *software*.

## **2 – A EVOLUÇÃO DA COMUNICAÇÃO MÓVEL**

### **2.1 – Introdução**

Desde as primeiras transmissões de rádio o homem buscou utilizar esse meio de comunicação em estações móveis. Inicialmente, as unidades móveis eram instaladas em veículos terrestres, barcos e aviões. Com a evolução da eletrônica a comunicação móvel passou a ser instaladas em pequenos veículos e em campo aberto com dispositivos portáteis, como, por exemplo, nos campos de batalha da primeira guerra mundial. Atualmente, os sistemas passaram a ser de alcance mundial e se tornaram de uso pessoal. Este Capítulo aborda de forma sucinta esta evolução dando destaque à parte teórica objeto de estudo deste trabalho.

### **2.2 – O início da comunicação móvel**

Pode-se considerar como o início da comunicação móvel as primeiras comunicações em campo da primeira guerra mundial (1914-1918) [12] onde a comunicação sem fio passou a ser utilizada de forma regular. Naquela época a rede de comunicação era bastante limitada, suportando apenas algumas comunicações simultâneas. Já, na segunda guerra mundial (1939-1945) houve uma grande evolução desse sistema. Além de permitir a comunicação entre aeronaves, tanques e outros veículos através de inúmeros canais de comunicação, na segunda grande guerra um soldado podia ter seu próprio equipamento de comunicação, como o rádio portátil SCR-300 fabricado pela Motorola que operava na faixa de frequência de 40 MHz à 48 MHz [13] Logo no final da segunda grande guerra, em 1946 a AT&T e a Southern Bell inauguraram um sistema de telefonia móvel via rádio para consumidores da cidade de St. Louis, Missouri. O sistema inicialmente operava com um pequeno número de canais na faixa de 150 MHz sendo que em 1947 este sistema foi ampliado com a autorização da FCC que passou a perceber o grande interesse público nesse tipo de serviço, nascendo, assim o Serviço de Telefone Móvel (MTS - *Mobile Telephone Service*) que incorporava um sistema de discagem automático. Esse sistema era comum nas grandes metrópoles tendo sua capacidade máxima explorada na década de 50 [14]. O sistema de telefonia móvel celular que se utiliza

atualmente surgiu, basicamente, na década de 80 [15]. Desde então, uma série de mudanças e grandes melhoramentos vêm sendo realizados, e em um contexto histórico podem ser divididos em quatro gerações.

A primeira geração da telefonia móvel portátil não transmitia sinais digitais, somente voz e foi marcada pelo lançamento em 1983 do telefone DynaTAC 8000x da Motorola. Pesando quase um quilo e custando aproximadamente quatro mil dólares, esse transceptor marcou o início da comunicação móvel pessoal [16]. O sistema utilizado nos Estados Unidos e adotado no Brasil era denominado Serviço Avançado de Telefone Móvel (AMPS - *Advanced Mobile Phone Service*). Inicialmente, este sistema comportava 666 canais de sinais analógicos de 30 KHz de largura. Nem todos os canais eram utilizados para voz do usuário, neste sistema 21 canais eram utilizados para controle possibilitando a identificação dos usuários, realização de chamadas entre outros. Cabe mencionar que o AMPS não foi o único sistema móvel celular analógico existente, na Europa foram utilizados os sistemas TACS, E-TACS, NMT 450, C-450, RMTS entre outros.

No Brasil, o sistema AMPS utilizava a faixa de 824-849 MHz no sentido Estação Móvel (EM) para Estação Rádio-base (ERB) e a faixa de 869-894 MHz no sentido contrário. Para que duas operadoras pudessem operar, a banda foi dividida em duas partes chamadas de Banda A e Banda B. Inicialmente, foi liberada uma faixa menor em 825 - 849 MHz e 870 - 890 MHz, sendo posteriormente estendida. A Fig. 2.1 ilustra a divisão da banda utilizada pelo sistema AMPS inicialmente no Brasil [17].

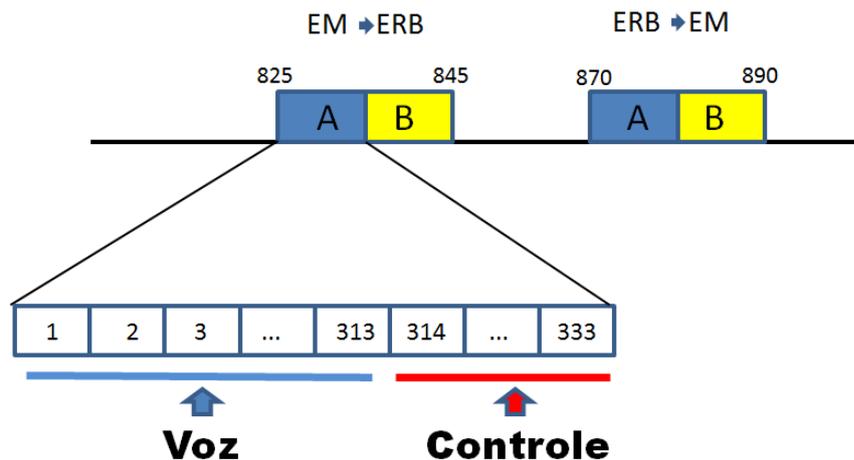


Fig. 2.1 – Divisão dos canais no sistema AMPS.

Pelos canais de controle eram enviados comandos de aumento de potência, liberação de chamada, mudança de canal, entre outros.

## 2.3 – A evolução dos sistemas

A telefonia móvel celular evolui rapidamente passando da transmissão de voz para transmissão de dados e desta para transmissão totalmente digital. Cada etapa relevante desse processo de evolução é denominada de geração. Os celulares de segunda geração (2G) transmitiam a voz digitalizada inicialmente como técnica de expansão de sua capacidade de usuários. Com a digitalização do sinal logo surgiu o primeiro sistema de trocas de mensagens, o SMS (*Short Message Service*). Neste período não existia um padrão internacional e os sistemas eram incompatíveis, sendo um serviço regional. Nesse período foram utilizadas as tecnologias de Acesso Múltiplo por Divisão do Tempo (TDMA- *Time Division Multiple Access*), a tecnologia de Acesso Múltiplo por Divisão de Código (CDMA- *Code Division Multiple Access*) [18], o Sistema Global de Comunicações Móveis (GSM- *Global System for Mobile Communication*) entre outras.

A digitalização do sinal da telefonia móvel foi um grande avanço e logo após a sua implantação novas tecnologias melhoraram ainda mais o sistema. Essas novas tecnologias propiciaram um aumento da capacidade do sistema como um todo com grande impacto na taxa de transmissão de dados. No período chamado de Segunda Geração e Meia (2,5G) da telefonia móvel celular foram criadas e implantadas no sistema GSM as tecnologias de Alta Taxa de Chaveamento de Dados (HSCSD - *High Speed Circuit Switched Data*) e os Serviços de Rádio de Propósito Geral (GPRS - *General Purpose Radio Services*).

O GPRS realizava uma conexão de dados por comutação de pacotes, uma grande evolução do sistema móvel que antes desse sistema era tratado como um serviço de comunicação de voz. No GPRS os slots de tempo do sistema GSM eram alocados somente quando pacotes de dados eram transmitidos. Os pacotes GPRS eram tratados separadamente da voz, sendo esta enviada no padrão GSM. Como o GSM e o GPRS podiam trabalhar em conjunto, em algumas implantações dados e voz podiam ser enviados e recebidos simultaneamente [19].

Visando uma padronização para as comunicações móveis, a Terceira Geração (3G) começou a ser desenvolvida, à partir do esforço promovido pela União Internacional de Telecomunicações (ITU – *International Telecommunication Union*). O passo mais importante foi a criação do fórum IMT2000 reunindo vários grupos de desenvolvimento em todo o mundo como ilustra a Fig. 2.2.

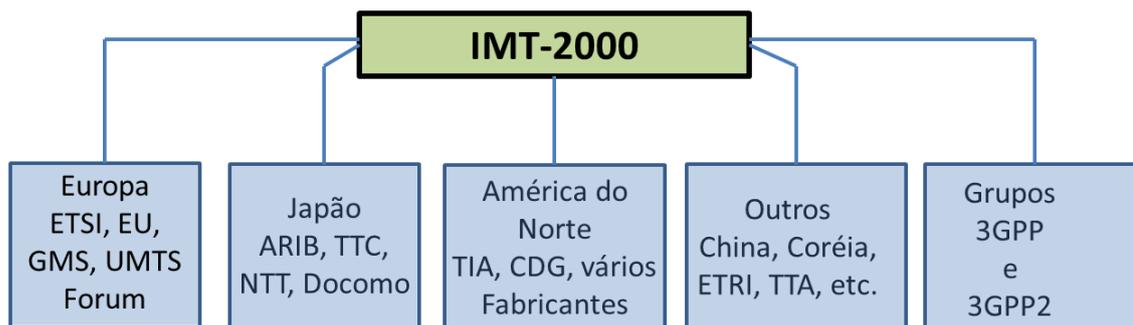


Fig. 2.2 – União das organizações para criação da tecnologia móvel celular 3G.

A 3GPP, uma organização criada em 1998 com o objetivo de padronizar as redes da terceira geração (3G) assumiu o projeto e definiu o Serviço Móvel Universal de Telecomunicações (UMTS - *Universal Mobile Telecommunication System*) [5][6][14]. A tecnologia 3G de redes móveis proporcionou um alcance global com transmissão de dados por pacotes em alta velocidade. A 3GPP define o padrão das redes até os dias atuais através de especificações que são lançadas de tempos em tempos. Essas especificações são chamadas tecnicamente de Releases e serão detalhadas no Capítulo 3.

A quarta geração da telefonia móvel celular (4G) é caracterizada pela rede totalmente comutada por pacotes e com suporte ao protocolo IPV6. Os dispositivos móveis nesse novo sistema enviam pacotes de dados que são encaminhados ao destino pela rede, isso difere muito da tecnologia 3G e anteriores que utilizavam uma ligação virtual dedicada à transmissão de informação entre as estações. A quinta geração da telefonia móvel celular (5G) ainda está em desenvolvimento. Está previsto para esse novo sistema uma alta taxa de transmissão, baixa latência e um grande número de dispositivos conectados permitindo recursos de multimídia, conexões M2M e a ampla utilização do conceito da internet das coisas IoT.

Como a tecnologia de redes 5G ainda está em desenvolvimento, esta está sendo objeto de estudo em todo mundo e obrigatoriamente deve se adequar à tecnologia já implantada com soluções inovadoras. Um dos grandes problemas previsto é a alta densidade de usuários e de estações desse novo sistema. O artigo intitulado “*Efficient Tracking Area Management in Carrier Cloud*” [20] dos autores M. Bagaa, T. Taleb e A. Ksentini publicado em 2015 destaca o problema da grande quantidade das mensagens de sinalização (*Paging*) a serem transmitidos nas novas redes da tecnologia 5G alertando para o fato desses sinais utilizarem parte dos recursos que, a princípio, poderiam ser utilizados pelos usuários com as unidades móveis. A solução encontrada pelos autores para amenizar o problema consiste em uma técnica de

distribuição das áreas de rastreamento e uma técnica de gerenciamento dessas áreas com mais eficiência.

Além das dificuldades do gerenciamento de unidades móveis que necessitam de mudança de célula existe a necessidade de gerenciamento de estações que saem de uma área de cobertura 5G e passam a utilizar outras tecnologias como a 4G. Essas estações devem receber um serviço sem interrupção e este assunto é analisado pelo artigo “*No Inter-Network Tracking Area Update Scenario Toward 5G Network*” [8] de 2016 dos autores H. A. Dorai e L. A. A. Irkhis, onde é estudado também o problema da estação móvel que entra em uma área sem cobertura sendo proposto um novo modelo de gerenciamento para células adjacentes ou próximas com tecnologias diferentes.

No artigo “*5G Ultra-Dense Cellular Networks*” [9] de 2016 dos autores X. Ge, S. Tu, G. Mao, C. Wang e T. Han as chamadas redes ultra densas são analisadas com relação a eficiência energética, a capacidade da rede próxima do usuário final (*Backhaul*) e principalmente tenta responder a seguinte pergunta: “Qual é a densidade necessária para uma rede ultradensa?”. Os resultados da simulação realizada pelos autores mostram que existe um limite que, quando ultrapassado, reduz a capacidade do *backhaul* e a eficiência energética do sistema. A Fig. 2.3 mostra o resultado obtido pelos autores e referenciado no artigo original como Figura 3(a).

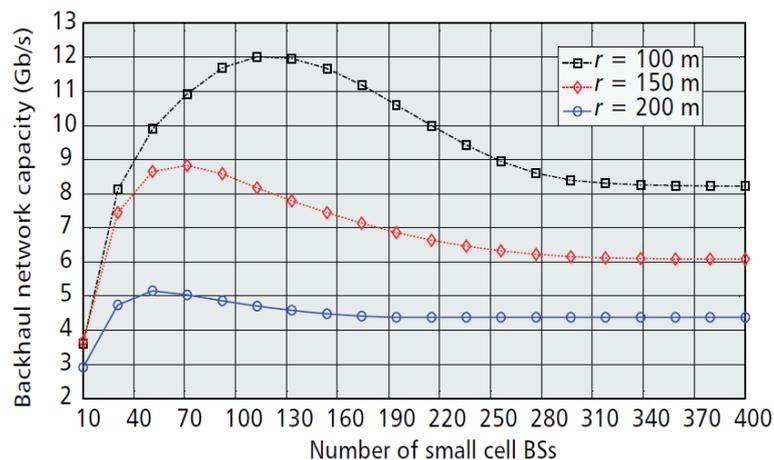


Fig. 2.3- Capacidade do *Backhaul* em função do número de estações base em uma região [9].

Neste gráfico é possível observar a capacidade da rede em três situações: em um raio de cobertura de 100m, 150m e 200m. Em todos os casos, a capacidade da rede aumenta com o número de pequenas estações até um valor limite, a partir desse limite o aumento do número

de células na região não contribui e até prejudica o funcionamento da rede.

Para melhorar a qualidade do serviço em altas frequências com altas taxas de transmissão o artigo “*High-Resolution Angle Tracking for Mobile Wideband Millimeter-Wave Systems With Antenna Array Calibration*” [21] dos autores D. Zhu, J. Choi, Q.Cheng, W. Xiao e R. W. Heath Jr. em 2018 apresenta um arranjo de antenas capaz de direcionar a transmissão em direção à estação móvel, sendo o mesmo sistema utilizado pelo receptor para recepção dos sinais. Este assunto, ou seja, o direcionamento de sinal para melhoria da qualidade do serviço está sendo amplamente estudado sendo um objeto de bastante interesse da comunidade científica atual, entre muitos artigos publicados recentemente tem-se o artigo “*Hybrid Beamforming With Selection for Multiuser Massive MIMO Systems*” [22] dos autores V. Ratnam, A. F. Molish, O. Y. Bursalioglu e H. C. Papadopoulos de 2018 que utilizam uma matriz de sinais analógicos para controlar o direcionamento do feixe reduzindo o custo do hardware utilizado nesses sistemas, o artigo “*Digital Beamforming-Based Massive MIMO Transceiver for 5G Millimeter-Wave Communications*” [23] também de 2018 dos autores B. Yang, Z. Yu, J. Lan, R. Zhang, J. Zhou e W. Hong, apresenta uma antena de feixe controlado de alto rendimento com 64 elementos de antenas trabalhando na faixa de 28 GHz entre outros.

Apesar da grande atenção dada aos sistemas de controle e aos sistemas de transmissão e recepção, a interligação desses sistemas foi muito pouco explorada. A diminuição do tráfego em *backhaul*, a redução do número de transmissões de rádio, a redução das limitações apresentadas na Fig. 2.3 quanto à densidade de células por região e a melhoria do gerenciamento como apresentados neste trabalho não estão sendo aproveitados no sistema atual, sendo esta a contribuição deste trabalho. O próximo Capítulo aborda o avanço tecnológico dos sistemas de telefonia móvel celular destacando as principais características técnicas que serviram de base para a consolidação do sistema atual.

### 3 – O AVANÇO TECNOLÓGICO E A TECNOLOGIA ATUAL

A tecnologia atualmente utilizada na telefonia móvel celular possui conceitos e características técnicas desenvolvidas e utilizadas desde a primeira geração. Porém, devido às grandes mudanças ocorridas no sistema, é considerado como tecnologia atual todas as características técnicas aplicadas à partir da segunda ou da terceira geração. Neste Capítulo será abordado em um contexto histórico os principais elementos desenvolvidos que compõem o sistema atual da telefonia móvel celular.

O sistema GSM utilizado na Europa não foi implantado no Brasil, porém dada à sua importância na evolução dos sistemas atuais este sistema merece atenção neste trabalho. O GSM era um sistema com arquitetura aberta possibilitando a comunicação entre equipamentos de diversos fabricantes favorecendo a diminuição dos custos de implantação e manutenção [2].

A característica mais marcante da tecnologia GSM da segunda geração foi a Modulação Gaussiana com Desvio Mínimo de Chaveamento (GMSK – *Gaussian Minimum Shift Keying*) [24], com a técnica de Múltiplo Acesso por Divisão do Tempo (TDMA – *Time Division Multiple Access*) [2].

Neste tipo de modulação o sinal é modulado em fase com mínimas mudanças abruptas chamada modulação MSK (*Minimum Shift Keying*) com a aplicação de um filtro Gaussiano que “suaviza” os chaveamentos do sinal digital antes da aplicação deste sinal no modulador. A Fig. 3.1 ilustra essa técnica que utiliza defasadores de sinal para produzir a variação de fase.

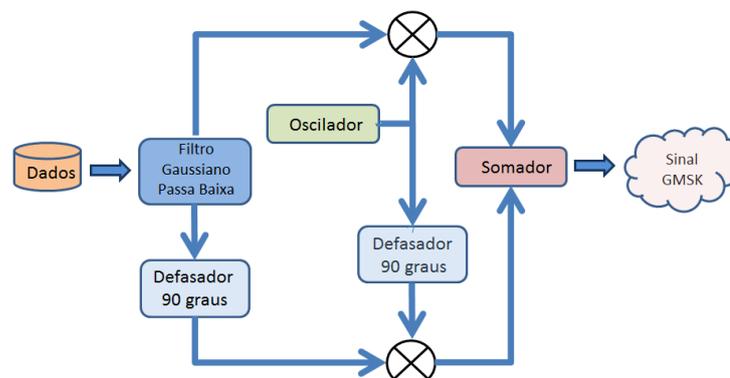


Fig. 3.1 – Modulador GMSK utilizando modulador em quadratura.

A técnica de modulação MSK produz baixa densidade de potência espectral nas laterais interferindo menos nos canais adjacentes [25]. Com a aplicação do filtro Gaussiano a densidade de potência fica ainda mais concentrada no centro da portadora sendo esse um dos

principais motivos da escolha desse tipo de modulação. Para transmissão de dados era utilizado o GPRS que realizava a conexão de dados por comutação de pacotes, uma grande evolução do sistema móvel que antes desse sistema era tratado como um serviço de comunicação de voz.

Em síntese pode-se dizer que a grande evolução da segunda geração foi o aumento da capacidade e da confiabilidade do sistema, a digitalização da voz e a possibilidade de transmissão de dados nas redes de telefonia móvel celular.

### **3.1 – A tecnologia EDGE**

A tecnologia de Transferência de Dados Melhorada para Evolução Global (*EDGE-Enhanced Data Rates for Global Evolution*) foi uma evolução do sistema GSM/GPRS muitas vezes chamada de geração 2,75G. Na tecnologia EDGE uma atualização de software das estações base (desde que os amplificadores de RF suportassem a nova técnica de modulação) introduzia um novo tipo de modulação no sistema, o 8PSK utilizado tanto para voz como para dados GPRS. Utilizando a mesma estrutura do GSM e GPRS com a largura de canal de 200 KHz a modulação 8-PSK permitia uma taxa de dados de 384 Kbps por portadora. Como esse tipo de modulação é eficaz apenas a curtas distâncias a técnica de modulação utilizada no GSM e GPRS continuavam a ser utilizadas. O grande desempenho proporcionado pela tecnologia EDGE se deve ao uso de uma técnica de modulação adaptativa. Esta técnica tem como princípio básico de funcionamento o monitoramento da qualidade dos canais em uso e diante dos valores obtidos a seleção do esquema de modulação e da codificação apropriados maximizando a transferência de dados.

### **3.2 – Release 99- UMTS**

A release 99 muitas vezes chamada de release 3 foi a primeira a definir um sistema de terceira geração móvel (3G), o Sistema de Telecomunicações Móvel Universal (UMTS - *Universal Mobile Telecommunication System*). Baseado no GSM/GRPS o UMTS utiliza o sistema a Modulação de Acesso Múltiplo por Divisão de Código em Banda Larga (WCDMA – *Wide Code Division Multiple Access*), uma técnica de modulação com espalhamento espectral para transmissão de dados e voz. Este tipo de tecnologia proporciona uma melhor eficiência espectral, ou seja, um melhor aproveitamento da banda para a operação em sistema

móvel. A Fig. 3.2 ilustra a interligação dos principais módulos do sistema UMTS integrando ao já implantado sistema GSM/GPRS [15].

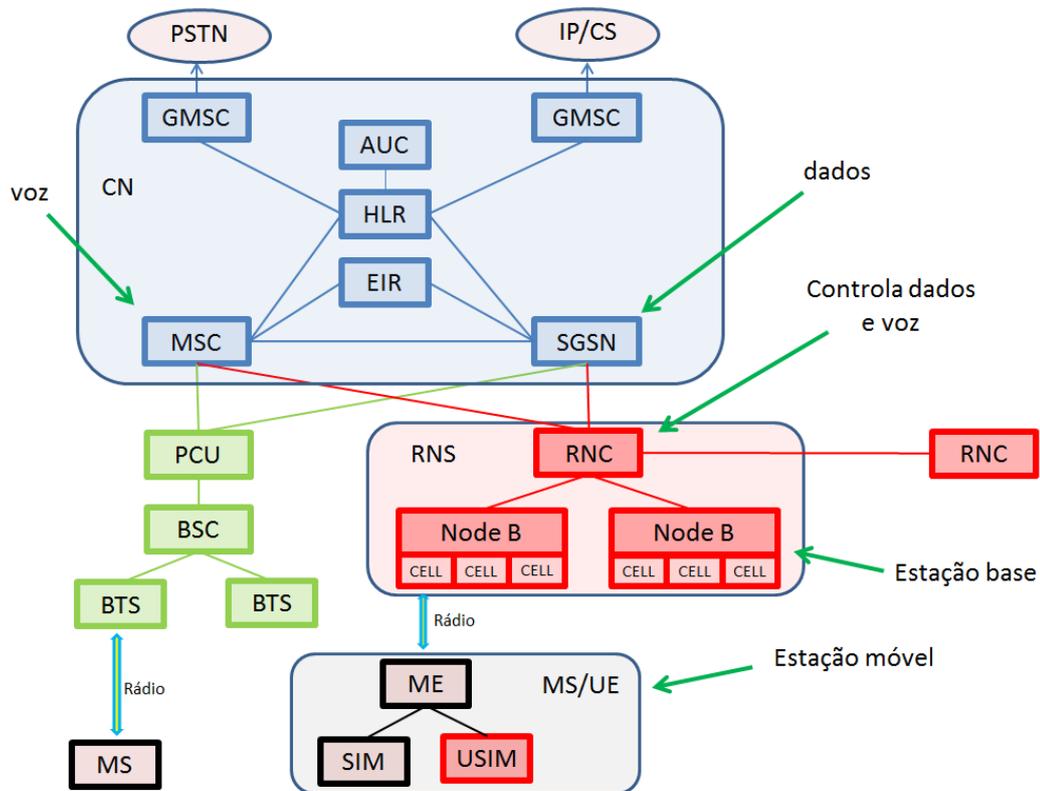


Fig. 3.2 – Introdução dos novos módulos na criação do UMTS sobre a rede GSM/GPRS.

Os módulos em destaque (cor vermelha) foram acrescentados ao sistema GSM/GPRS através da Release 99 do 3GPP [26][27]. A controladora de rede via rádio (RNC - *Radio Network Controller*) faz o controle das informações de dados e voz enviando e recebendo essas informações da central de chaveamento móvel (MSC - *Mobile Switching Centre*) responsável no GSM pela transmissão da voz e da ligação de suporte para serviço GPRS (SGSN - *Serving GPRS Support Node*) responsável pela transmissão dos pacotes de dados na rede GPRS. O RNC também controla as estações base denominadas Nodes B e se comunica com outras entidades RNC. O bloco formado por uma RNC e seus Nodes B é chamado de subsistema de rede via rádio (RNS - *Radio Network Subsystem*). Os nodes B controlam as células e diferem da BTS principalmente por utilizarem o WCDMA. Com relação aos protocolos utilizados, estes foram mantidos no núcleo principal da rede GSM, porém novos protocolos foram de Acesso Terrestre Universal (UTRAN - *Universal Terrestrial Radio Access Network*) formado por todas as entidades RNCs e seus componentes controladas pelo Núcleo da Rede (CN - *Core Network*).

### 3.3 – Release 4

O avanço mais importante introduzido na Release 4 da 3GPP foi a separação do tipo de dado enviado para a MSC. Nesta nova etapa de desenvolvimento a MSC foi dividida em duas partes, o servidor central de chaveamento móvel (MSC-S - *Mobile Switching Centre Server*) e o Circuito de Chaveamento de Porta de Acesso ao Meio (CS-MGW - *Circuit Switch Media Gateway*) como mostra a Fig. 3.3.

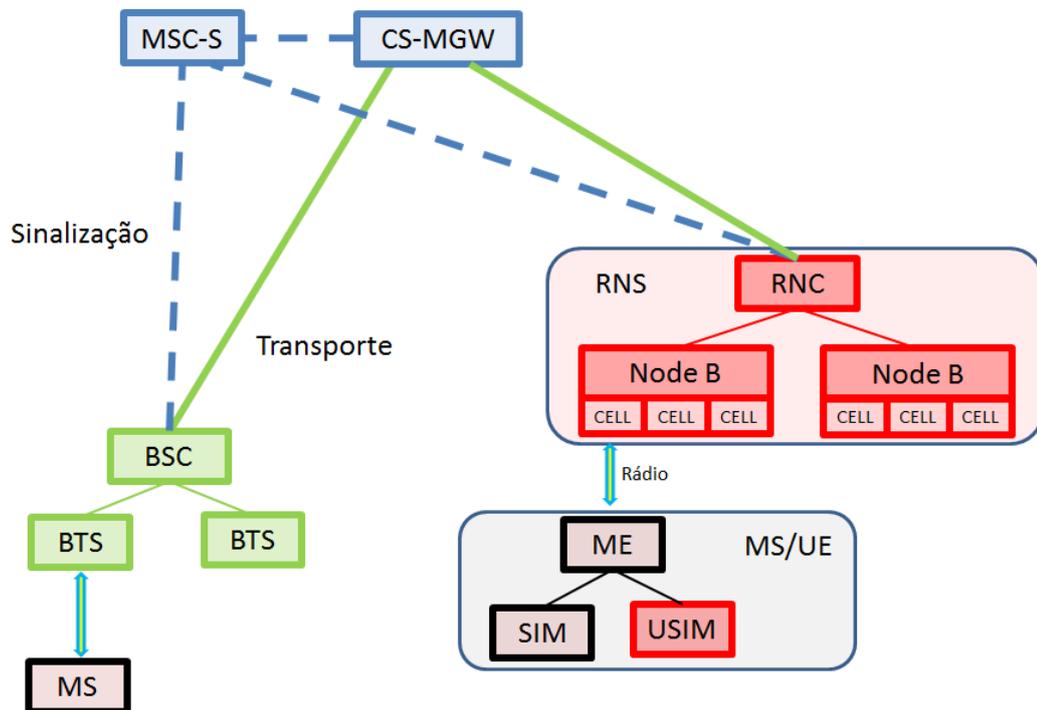


Fig. 3.3 – Divisão da MSC em duas partes: MSC-S e CS-MGW.

Com essa separação os dados do usuário foram separados dos dados de sinalização abrindo caminho para prestação de novos serviços como, por exemplo, a utilização do protocolo IP. Como o MSC era parte integrante do núcleo central essa foi a primeira grande mudança no núcleo da rede 3G [28].

### 3.4 – Release 5 - HSDPA

O Acesso por Pacotes de Descida de Alta Velocidade (HSDPA - *High Speed Downlink Packet Access*) é um recurso baseado no compartilhamento do canal de dados no sentido da estação base para a estação móvel (*downlink*) que permite elevar a taxa de transferência até

10Mb/s. Ele foi projetado para suportar serviços que requerem altas taxas instantâneas de *downlink* (sentido estação base para estação móvel) e baixa transferência de *uplink* (sentido estação móvel para estação base). Além de aumentar a taxa de transmissão no sentido da estação base para a estação móvel reduz o número de retransmissões na conexão via rádio e em camadas superiores. Como exemplo de uso desse sistema está o uso de navegadores de internet e demanda de vídeo [29].

Uma das principais características do HSDPA é a conexão adaptativa (*link* adaptativo) onde o esquema de transmissão muda a cada intervalo de tempo de transmissão se adaptando às condições da conexão via rádio. O *link* adaptativo possui uma série de combinações de modulação e codificação de canal. O Node B seleciona o tipo de modulação para cada usuário baseado na estimativa de taxa de *downlink*. Sistemas de modulação avançados como o 16QAM são utilizados quando as condições de conexão de rádio são boas, quando as condições não são boas a modulação QPSK é utilizada para manter a taxa de erro de bits à níveis aceitáveis. Esse sistema de controle é chamado de Codificação e Modulação Adaptativa (AMC – *Adaptive Modulation and Coding*). Este sistema é diferente do sistema adaptativo definido pela Release 99 pois a decisão do tipo de modulação é feita no Node B e não na central de controle de nodes RNC.

### 3.5 – Release 6 - HSUPA

Com o objetivo de transmitir dados de multimídia um novo serviço chamado Serviço de Multi-difusão e Difusão Multimídia (MBMS - *Multimedia Broadcast Multicast Service*) foi criado pela Release 6. Esta nova funcionalidade possibilita o compartilhamento da transmissão de rádio bem como o compartilhamento dos recursos do núcleo da rede. Também na Release 6 foi introduzido um melhoramento na transmissão *uplink* para canais de transporte. Um canal dedicado chamado de Canal Dedicado Avançado (E-DCH – *Enhanced Dedicated Channel*) foi definido com tempo duração da transmissão de rádio de apenas 1ms. Esse sistema foi chamado de HSUPA por ter aumentado a capacidade de transmissão via rádio da mesma forma que o HSDPA, sendo neste caso um aumento no canal de *uplink* [30].

### 3.6 – Release 7 - HSPA+

Muitas vezes chamada de HSPA+ (*High Speed Packet Access Plus*) a Release 7 introduziu melhorias na Rede de Acesso de Rádio do GSM EDGE (GERAN - *GSM EDGE Radio Access Network*) com o uso de duas portadoras no modo *downlink* [31]. Essa técnica contorna a limitação existente no sistema GSM onde a largura de banda está limitada em 200 KHz. Teoricamente o uso de duas portadoras dobra a capacidade de transmissão de dados que nesse sistema atingem picos de duas vezes 473.6 Kbps, ou seja, próximo de 1 Mb/s. Além disso, o longo estudo da utilização das Antenas de Múltiplas Portas de Entrada e Múltiplas Portas de Saída (MIMO - *Multiple Input Multiple Output*) iniciado em 2001 evoluiu, sendo considerado nesta release a utilização de antenas MIMO com o objetivo de melhorar o sistema através da diversidade e da multiplexação espacial [32].

### 3.7 – Release 8 – LTE

A release 8 da 3GPP iniciou a quarta geração da telefonia móvel celular (4G) definindo para essa nova rede um sistema totalmente comutado por pacotes com suporte ao Protocolo Internet Versão 6 (IPv6). Este novo padrão define uma solução de banda larga chamada Evolução de Longo Prazo (LTE – *Long Term Evolution*). Assim, a tecnologia 4G foi concebida visando a transmissão de dados e não a transmissão da voz.

Nessa nova fase a UTRAN passou a ser denominada E-UTRAN (*Evolved UTRAN*) e consiste de estações eNodeBs (*evolved Node B*) interconectadas umas as outras por uma interface denominada X2. Cada estação eNodeB é conectada à uma Rede Evoluída de Comunicação de Pacotes (EPC – *Evolved Packet Core*) por uma interface chamada S1. O EPC é formado pela Serviço de Porta de Acesso (S-GW - *Serving gateway*) para dados do usuário e pela Entidade de Gerenciamento Móvel (MME - *Mobile Management Entity*) para dados de sinalização. A Fig. 3.4 ilustra esta nova configuração.

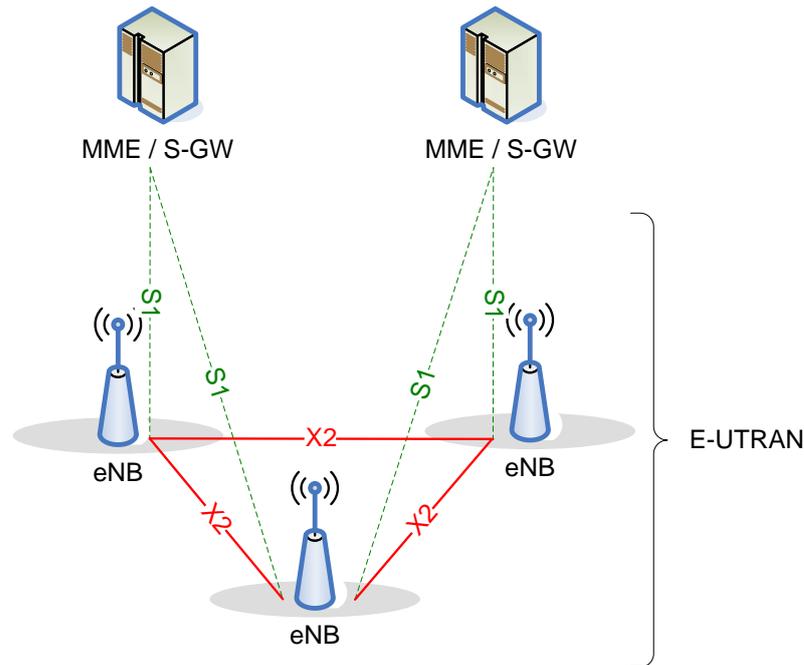


Fig. 3.4 – Interligação entre as eNBs e EPC (MME/S-GW)[10]

O núcleo EPC é totalmente IP e baseado em transmissão de pacotes com suporte à IPv6. As estações eNodeBs possuem as seguintes funções:

- Controle das portadoras utilizadas.
- Controle da conexão móvel.
- Alocação de recursos dinâmicos tanto para *uplink* como para *downlink*.
- Compressão do cabeçalho IP e criptografia dos dados do usuário.
- Seleção da MME quando a estação móvel não especificar.
- Roteamento dos dados do usuário para o servidor gateway S-GW.
- Agendamento da transmissão de mensagens originadas pela MME.
- Agendamento da transmissão de mensagens broadcast.
- Medições para configuração dos parâmetros de mobilidade e agendamento.

A E-UTRA que possibilita a conexão da unidade móvel com o sistema pode trabalhar com larguras de banda de 1,4, 3, 5, 10, 15 e 20 MHz com uma configuração realizada em forma de blocos de recursos com os valores 6, 15, 25, 50, 75 e 100 em canais de 100 KHz. Neste sistema dois modos de duplexação são permitidos: Duplexação por Divisão de Frequência (FDD – *Frequency Division Duplex*) e Duplexação por Divisão do Tempo (TDD -

*Time Division Duplex*). A Fig. 3.5 ilustra a alocação de Blocos de Recursos (RB – *Resource Block*) para uma transmissão, cada subdivisão é um recurso físico de comunicação de dados multiplexados no tempo e na frequência.

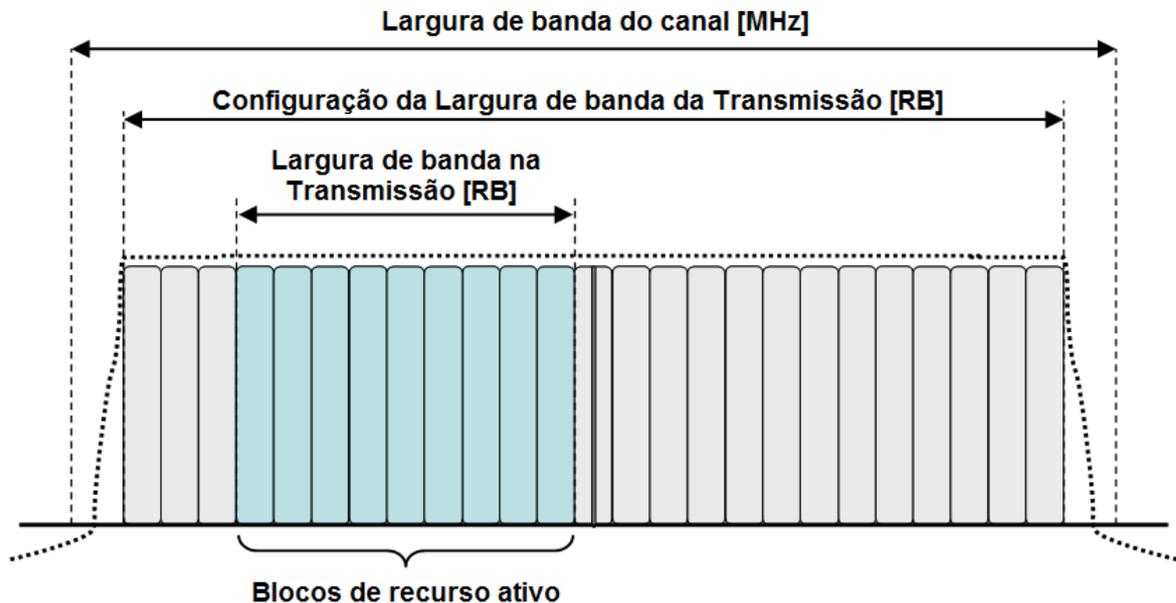


Fig. 3.5 – Alocação de blocos para transmissão dos dados [10].

Na modulação, o LTE utiliza a Multiplexação por Divisão de Frequência Ortogonal (OFDMA – *Orthogonal Frequency Division Multiplexing Access*) para *downlink* que resulta em um ganho de largura do espectro e a Modulação por Multipla Divisão de Frequência em Portadora Única (SC-FDMA - *Single Carrier Frequency Division Multiple Access*) no *uplink* que reduz o consumo de energia da unidade móvel [10].

### 3.8 – Release 9

A Release 9 do 3GPP definiu alguns sistemas que auxiliam a população em caso de emergência como em terremotos e tsunamis, também introduz a integração completa do conceito de Fentocélula com o nome de Home eNodeB (Node B em casa) além de definir novas bandas de frequência como 800 MHz e 1500 MHz para o serviço LTE [7]. Um resumo da evolução do sistema até o lançamento da Release 9 é apresentado na Fig. 3.6.

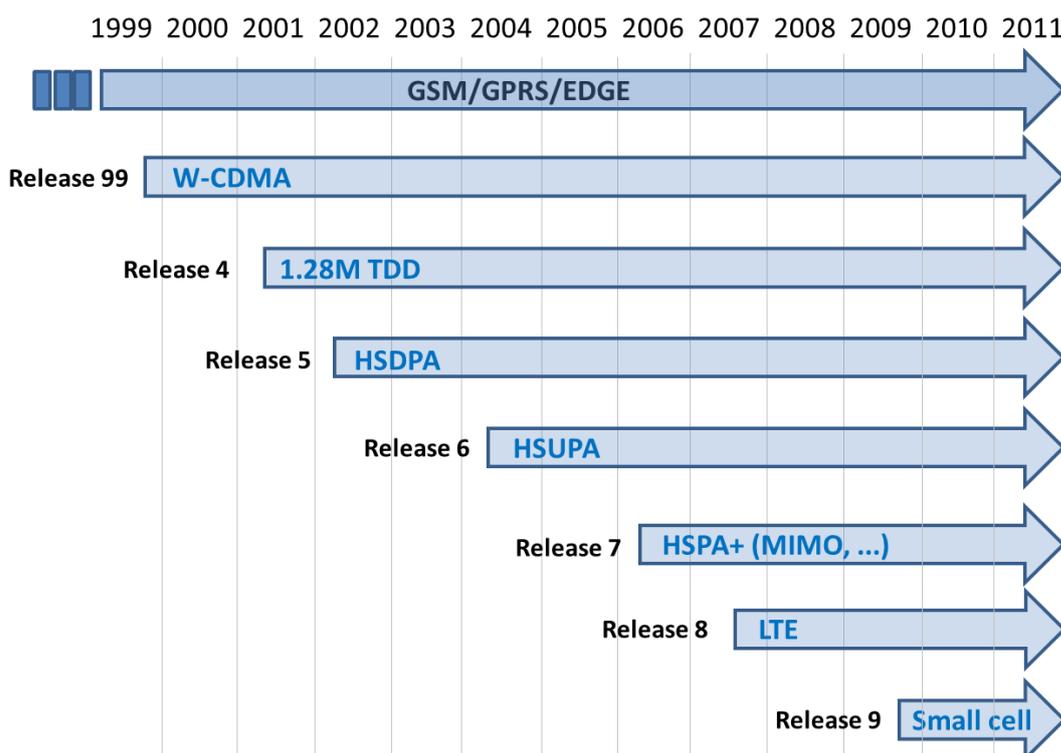


Fig. 3.6 – Resumo da evolução da telefonia móvel até a Release 9 .

### 3.9 – Release 10 – LTE *Advanced*

O LTE avançado (*LTE Advanced*) aumentou a taxa de bits com baixo custo. O pico teórico de transferência de dados foi para 3 Gbps em *downlink* e 1,5 Gbps em *uplink*. A eficiência espectral de 16 bps/Hz estabelecida pela Release 8 passou para 30 bps/Hz nesta nova versão do sistema. Houve melhorias também com relação ao número de usuários do sistema e uma melhoria no funcionamento das células com a utilização das antenas MIMO.

A ampliação da capacidade de transmissão de um sistema está associada diretamente ao aumento da largura de banda utilizada. Na tecnologia *LTE Advanced* as portadoras já presentes com largura de banda de 1,4, 3, 5, 10, 15 ou 20 MHz podem ser agrupadas formando um conjunto de até 5 portadoras. Desta forma uma largura de banda máxima de 100 MHz pode ser utilizada. A Fig. 3.7 ilustra essa técnica.

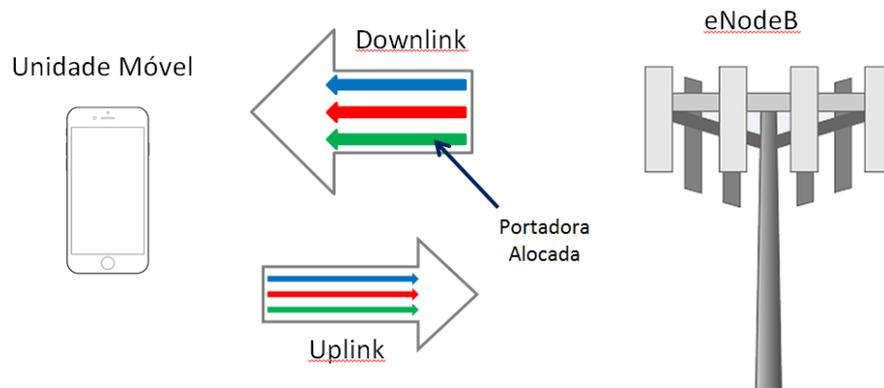


Fig. 3.7 – Agregação de portadoras para aumento da taxa de dados.

O número de portadoras agregadas no *uplink* não pode superar o número de portadoras agregadas em *downlink* sendo permitida a agregação de portadoras de largura de bandas diferentes.

A multiplexação espacial através da utilização de antenas MIMO também foi introduzido pela Release 10, nesta configuração o aumento da taxa de transmissão é realizada através da transmissão de dois ou mais diferentes conjuntos de dados em diferentes antenas utilizando os mesmos recursos (frequência e tempo) separadas somente pela diferença de referência do sinal. A Fig. 3.8 ilustra este tipo de transmissão.

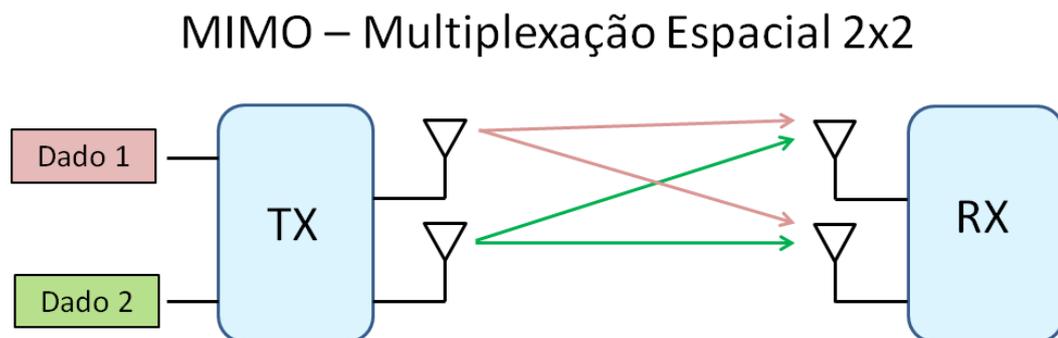


Fig. 3.8 – Multiplexação espacial utilizando antena MIMO 2x2.

Essa técnica é viável somente quando a relação sinal ruído é bastante elevada. Os efeitos de propagação podem provocar erros de interpretação de sinal. Para que isso não ocorra um Sinal de Referência (CRS - *Cell-specific Reference Signal*) é transmitido com os sinais de dados em cada antena permitindo a avaliação da influência do meio de transmissão no sinal transmitido. A Release 10 também prevê a utilização dos chamados Pontos de Transmissão (*Relay Nodes*) que são estações base de baixa potência que não necessitam de conexão por fibra óptica aumentando a capacidade ou a cobertura das células [33].

### 3.10 – Release 11

A release 11 introduz um novo recurso chamado Multi-ponto Coordenado (CoMP – *Coordinated Multi Point*) ao sistema de telefonia móvel celular. No CoMP um conjunto coordenado de pontos de transmissão no sentido *downlink* e um conjunto coordenado de receptores no sentido *uplink* são utilizados. Esse conjunto de transmissores e receptores podem estar em diferentes localidades e fazerem parte de diferentes estações eNodeBs. O CoMP pode funcionar de diferentes maneiras. Os dados na tecnologia LTE são transmitidos em pacotes chamados quadros (*frames*), esses pacotes podem ser divididos em 10 subquadros (*subframes*), quando dois ou mais pontos de transmissão transmitem na mesma frequência e no mesmo sub-quadro (*subframe*) o modo de operação é denominado Transmissão Conjunta (*Joint Transmission*). A Fig. 3.9 ilustra este tipo de operação que é realizada no sentido *downlink*.

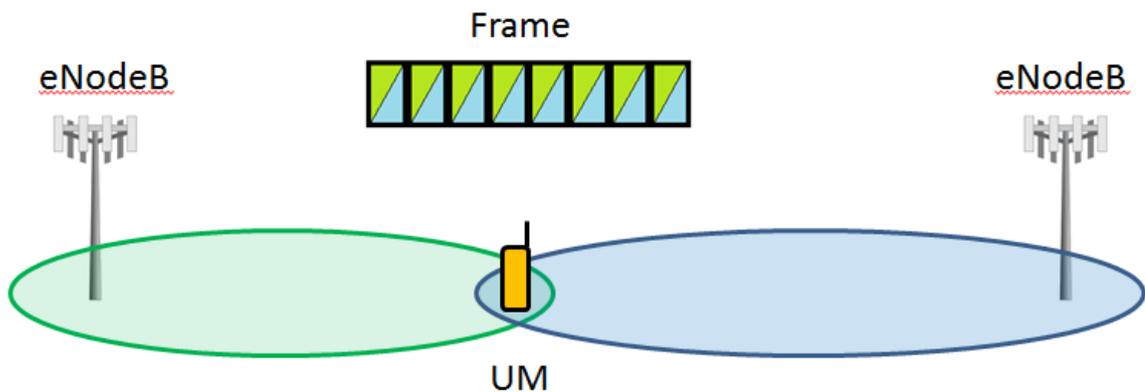


Fig. 3.9 – Transmissão em *downlink* no modo *Joint Transmission*.

Como as transmissões são coordenadas, é possível também efetuar a transmissão com duas ou mais estações utilizando *subframes* diferentes em cada estação transmissora. Esse modo de operação é denominado Seleção Dinâmica de Ponto (*Dynamic Point Selection*) e está ilustrado na Fig.3.10.

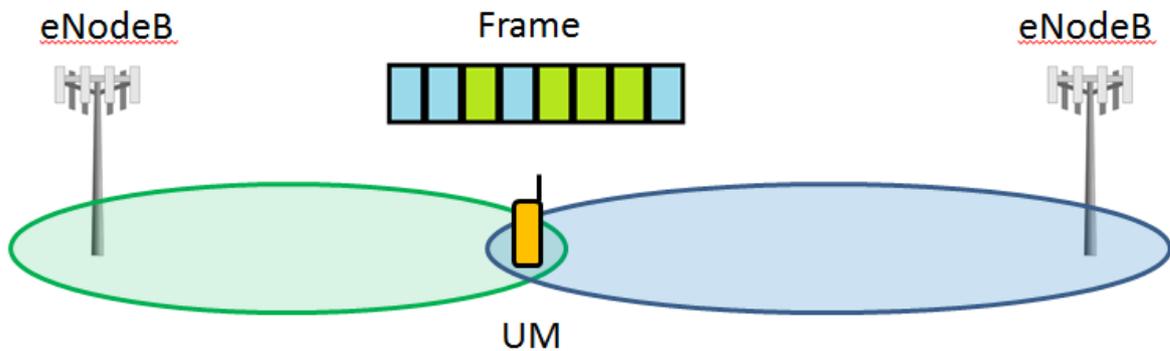


Fig. 3.10 – Transmissão em *downlink* no modo *Dynamic Point Selection*.

Além deste avanço a Release 11 aumentou a eficiência do sistema através da redução da interferência entre células e melhorias no sistema de controle [34].

### 3.11 – Release 12

Esta nova fase de desenvolvimento teve como objetivo o aumento da capacidade do sistema, o aumento do tempo de duração da carga da bateria, a redução do consumo de energia da rede, a maximização da eficiência do custo e outros fatores que deixaram o sistema mais rápido e mais confiável. O sistema de modulação mais avançado passou do 64QAM para o 256QAM. A tecnologia LTE passou a ser utilizada de forma mais eficiente em situações de emergência e em serviços de segurança. Melhorias no sistema incluíram o maior uso de pequenas células e a integração da tecnologia WIFI ao sistema [35].

### 3.12 – Release 13

A Release 13 foi completamente finalizada em junho de 2016 [36][37], A agregação de portadoras foi consolidada na Release 10 com até 5 portadoras de *downlink* e 5 portadoras de *uplink*, na Release 13 o estudo da agregação das portadoras passa de 5 para 32 portadoras. Com relação às antenas MIMO, a Release 13 prevê um aumento da eficiência com o controle do lóbulo vertical, ou seja, o conjunto de antenas que antes podiam direcionar sua irradiação em uma determinada direção na horizontal (azimute) agora poderão fazer esse controle

também na vertical (elevação) através do sistema de antenas ativas (AAS - Active Antena Systems), composto de transceptores e elementos irradiantes na estação base. Ainda com relação às antenas MIMO, arranjo de antenas com 64 portas está previsto, o limite anterior era de 8 portas.

### 3.13 – Release 14, 15 e 16

A Release 14 apesar de estar finalizada até o momento não está com a documentação disponível, porém é possível afirmar que a evolução da LTE continuou a ser priorizada nesta etapa dos trabalhos [38]. As Releases 15 e 16 são as primeiras da chamada geração 5G da telefonia móvel celular. O primeiro estágio da Release 15 já se iniciou como apresenta o calendário divulgado pela 3GPP e mostrado na Fig. 3.11.

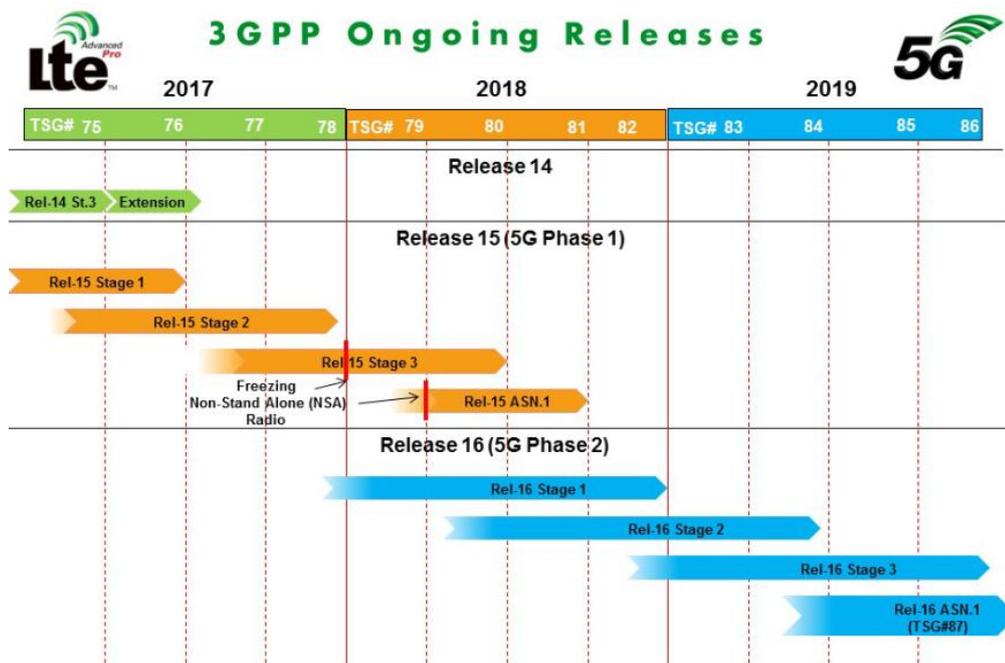


Fig. 3.11 – Previsão dos trabalhos da 3GPP.

As principais características esperadas para o sistema 5G são [39]:

- a) Velocidade: É esperada uma taxa de transmissão de 20 Gb/s em *downlink* e 10 Gb/s para *uplink*.
  
- b) Latência: No 5G a latência máxima prevista será de 4 ms contra os atuais 20 ms da tecnologia LTE.
  
- c) Capacidade: Um grande aumento na quantidade de usuários também será um ponto forte da tecnologia 5G, alguns trabalhos citam 1 milhão de dispositivos por quilometro quadrado, um valor talvez inatingível.
  
- d) Frequência: Para se conseguir uma taxa de dados tão elevada será necessário a utilização de faixas de frequências altas, acima de 6 GHz.

## 4 – A DETERMINAÇÃO DA DIREÇÃO E LOCALIZAÇÃO

### 4.1 – Introdução

Definido pela Release 99 da 3GPP, o Serviço de Localização (LCS - *Location Services*) é um instrumento que permite a localização da estação móvel com o objetivo de oferecer indicações de serviços próximos como restaurantes e outros serviços. Inicialmente criado para utilização em situações de emergência, este serviço passou a ser considerado para uso comercial pelo 3GPP. O LCS foi introduzido ao GSM de forma incompleta, sendo melhorado e adaptado para o UMTS [7]. Este sistema de localização é baseado em 3 funções:

- A medição do sinal de rádio realizado pela Unidade de Medição de Localização (LMU – *Location Measurement Unit*).
- O diálogo entre a rede e a estação móvel realizada pela Porta de Acesso Central de Localização do Móvel (GMLC - *Gateway Mobile Location Centre*).
- O cálculo da posição, realizado pelo Serviço Central de Localização do Móvel (SMLC - *Serving Mobile Location Centre*).

A Fig. 4.1 ilustra os principais elementos do serviço de localização implantado nos sistemas GSM e UMTS, em destaque (vermelho) as unidades do LCS.

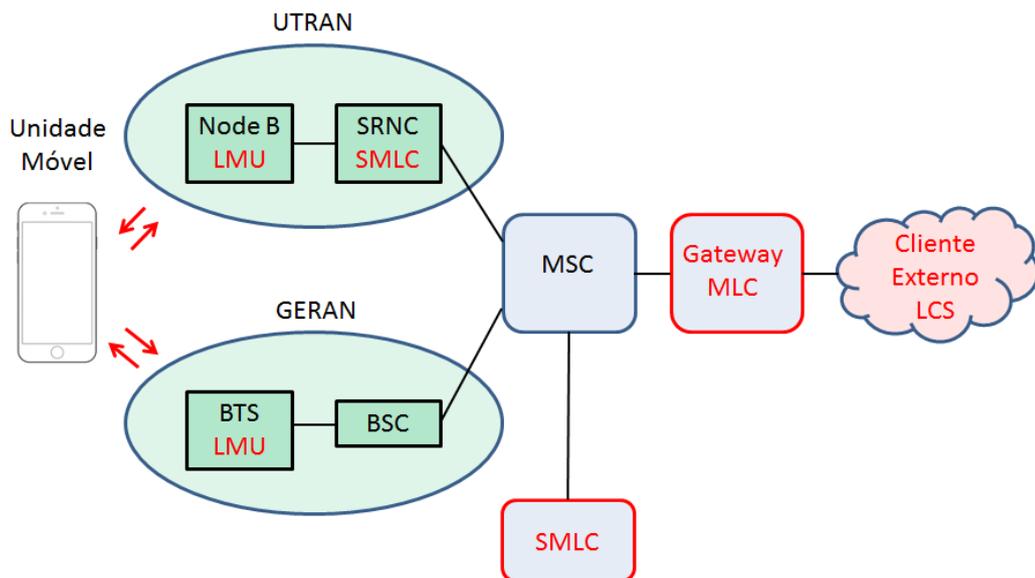


Fig. 4.1 – Sistema de localização LCS na arquitetura GSM e UMTS.

Neste esquema, a GERAN responsável pelo tráfego de dados via rádio em uma rede GSM tem incorporada a ela a Unidade de Medição de Localização LMU, o mesmo ocorre na UTRAN em redes UMTS que além da LMU possui um módulo SMLC com capacidade de realização de cálculos estimando a posição da estação móvel. Para realização dos mesmos cálculos para sinais recebidos pela GERAN uma unidade SMLC é utilizada junto à central MSC. Também ligada a central MSC o Gateway MLC (GMLC) fornece as informações de localização ao cliente externo que utiliza as informações obtidas para serviços de emergência ou para propósitos comerciais. O fluxo de dados para obtenção da posição de uma unidade móvel segue o diagrama ilustrado na Fig. 4.2 [26]:

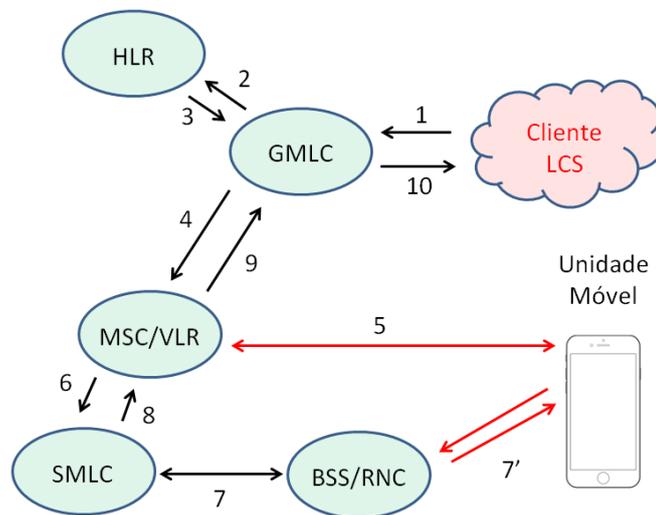


Fig. 4.2 – Fluxo de dados do sistema de localização LCS.

Neste diagrama, as seguintes etapas são seguidas:

- 1) O cliente LCS envia uma mensagem de localização da unidade móvel ao GMLC.
- 2) O GMLC consulta o Banco de Dados dos Usuários (HLR - *Home Location Register*) para obter endereço atual (MSC/VLR) na rede da estação móvel solicitada.
- 3) O HLR responde após verificar se o GMLC possui autorização para receber a informação.
- 4) O GMLC solicita à estação MSC/VLR à informação.
- 5) O MSC/VLR verifica se a estação móvel responde e se autoriza a transmissão.
- 6) O MSC/VLR solicita a localização ao SMLC.
- 7) O processo de rádio localização é ativado no Subsistema de Estação Base (BSS - *Base Station Subsystem*) do GSM e na RNC do sistema UMTS que estima a localização.
- 8) O resultado desse processo é fornecido ao MSC/VLR.

9) A informação chega ao GMLC.

10) A localização da estação móvel é enviada ao cliente LCS.

Por se tratar de tecnologias diferentes, o processo de rádio localização (passo 7) não é o mesmo para sistemas GSM e para sistemas UMTS. No GSM esse processo é realizado de quatro formas e no UTRAN de três formas [7].

No GSM os seguintes procedimentos são utilizados:

- Avanço de tempo (TA - *Timing Advance*): esse método determina a posição em forma de um anel baseado no tempo de resposta da estação levando-se em conta a velocidade de propagação das ondas eletromagnéticas no meio.
- Tempo de chegada de *uplink* (TOA - *Time of Arrival*): esta técnica utiliza várias estações para receber o sinal de *uplink* e através de triangulação localizar a estação móvel.
- Diferença de tempo de observação avançada (E-OTD – *Enhanced Observed Time Difference*): neste procedimento a estação móvel mede o tempo de chegada de três sinais emitidos por três estações BTS, o posicionamento pode então ser calculado na própria estação móvel ou pela SMLC com as informações fornecidas pela estação móvel.
- Dados do Sistema de Posicionamento Global (GPS - *Global Positioning System*): neste modo a informação é obtida pela estação móvel através do uso de satélites.

No UTRAN os seguintes procedimentos são utilizados:

- Identificação da célula: este procedimento é o mais simples de todos. A informação obtida é simplesmente em qual célula o móvel está conectado.
- Observação da diferença do tempo de chegada (OTDOA-IPDL - *Observed Time Difference Of Arrival – Idle Period DownLink*): neste procedimento um sinal de referência de duas estações NodeB são enviados de forma a formar uma hipérbole delimitando a localização do móvel. Com a utilização de mais uma estação NodeB duas novas hipérbolas são determinadas sendo que, a intersecção entre elas determina a posição do móvel.
- Dados do GPS: similar ao utilizado pelo GSM.

Para o sistema UMTS alguns outros métodos foram sugeridos e posteriormente rejeitados, entre eles a determinação da direção dos sinais pelo ângulo de chegada (AoA-

*Angle of Arrival*) sugerido por este trabalho como técnica de determinação da direção de sinal. Com a evolução dos sistemas, em 2003 a Release 5 define o AoA como um método impreciso que poderá ser aprimorado e utilizado no futuro através de antenas adaptativas [29].

## 4.2 – O sistema de localização no LTE

A tecnologia LTE (*Long Term Evolution*) é uma tecnologia totalmente digital e foi introduzida pela Release 8 da 3GPP, porém com nenhum suporte explícito ao sistema de localização. No contexto do LTE, somente a localização por identificação da célula utilizada pela estação móvel e a utilização de satélites permitiam a localização da estação móvel. Os sistemas de localização utilizados no GSM não foram definidos para o LTE. A Release 9 da 3GPP incluiu métodos de posicionamento similares aos utilizados pelo GSM como E-OTD, OTDOA-IPDL e pela triangulação utilizando estações base [7].

O E-OTD foi criado para o sistema GSM e consiste na recepção de sinais pela unidade móvel, sinais estes emitidos pelas estações BTS na vizinhança com informações do tempo (relógio). Baseado na diferença de tempo de chegada de cada sinal, a estação móvel determina seu posicionamento. A Fig. 4.3 ilustra este procedimento.

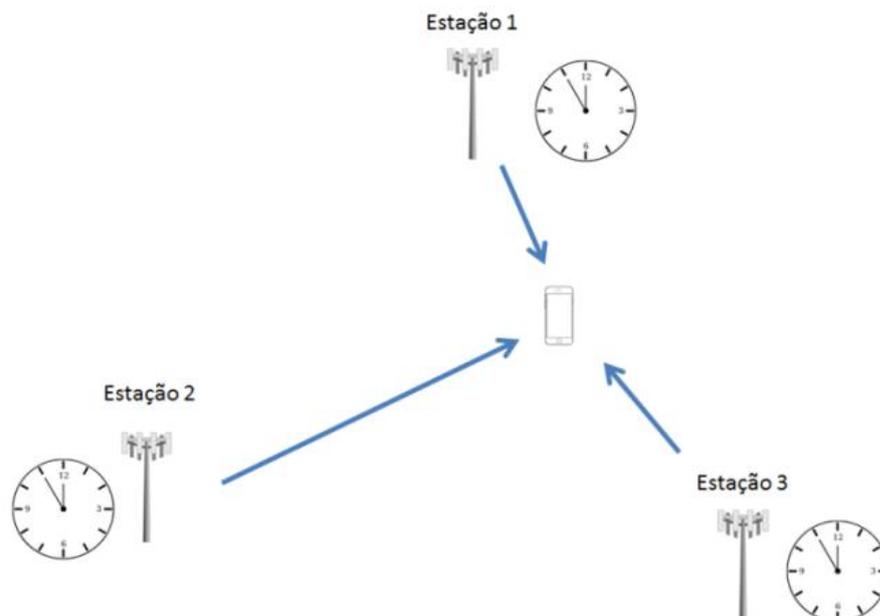


Fig. 4.3 – Princípio de funcionamento do E-OTD e OTDOA nas redes GSM e LTE.

O procedimento de localização da estação móvel consiste em:

- 1) As estações base enviam sinais com o horário exato da transmissão.

- 2) A estação móvel recebe e armazena essas informações para serem processadas.
- 3) Baseado na diferença de tempo de todos os sinais recebidos pela estação móvel sua posição é calculada.

O OTDOA utilizado nas redes UMTS segue o mesmo princípio de funcionamento do E-OTD nas redes GSM, a principal diferença está no fato de que, no sistema OTDOA utilizado nas redes UMTS, períodos de tempo inativos são inseridos para maximizar a probabilidade de recebimento dos sinais [40].

### 4.3 – Outras técnicas de direção e localização

O processo de determinação da direção de outras estações baseado na recepção dos sinais transmitidos por estas estações é chamado de radiogonometria ou radiolocalização [41]. Somente com a informação de uma única estação na maioria dos casos é possível obter somente a direção do sinal. Porém, utilizando técnicas como o tempo de chegada do sinal (ToA - *Time of Arrival*), ou através da medição da intensidade do sinal é possível determinar também a localização da estação móvel desejada. As principais técnicas utilizando radiofrequência para determinação da direção ou da localização de estações transmissoras são:

**Tempo de chegada (ToA):** A localização por tempo de chegada ou TOA utiliza o tempo de percurso de um sinal entre o transmissor e o receptor para determinação da localização. Esse sistema de localização necessita de uma sincronização muito grande dos equipamentos, pois erros da ordem de microssegundos produzem grandes erros na avaliação da distância [42]. A Fig. 4.4 ilustra esse procedimento.

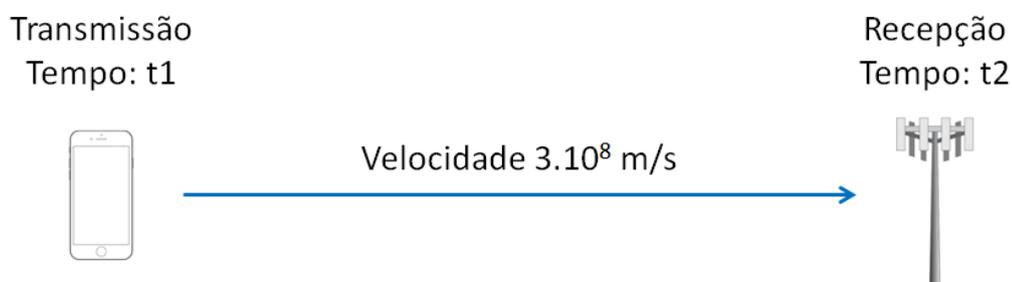


Fig. 4.4– Determinação da distância pelo tempo de percurso.

Como a velocidade de propagação é considerada constante na propagação em espaço livre, a distância entre as estações fica determinada pela equação:

$$\text{Distância} = 3 \cdot 10^8 \cdot (t_2 - t_1) \quad (1)$$

Por exemplo, para um tempo de percurso de  $1\mu\text{s}$  a distância entre as estações é de:

$$\text{Distância} = 3 \cdot 10^8 \cdot (1 \cdot 10^{-6})$$

$$\text{Distância} = 300\text{m}$$

Neste exemplo, a medição do tempo de chegada igual a  $1\mu\text{s}$  definirá uma circunferência com raio igual à 300m. Baseado nesta informação, existem duas formas de localização que podem ser utilizadas: a estação móvel é a estação transmissora e as estações base receptoras, ou as estações base são transmissoras e a estação móvel a receptora. A Fig. 4.5 ilustra um possível cenário.

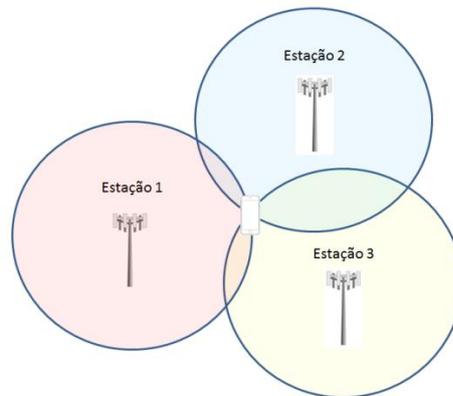


Fig. 4.5– Determinação da posição utilizando TOA e triangulação.

Se for considerado na Fig. 4.5 que a estação móvel é a transmissora, cabe às estações base medirem o tempo necessário para que o sinal da estação móvel seja recebido. Com essas informações a triangulação (ponto de intersecção entre os círculos) pode ser utilizada para determinação da localização. No caso das estações base serem transmissoras cabe a estação móvel receber todos os sinais medir o tempo de chegada de cada um deles e processar a informação. O sistema GPS trabalha com esse princípio, ou seja, a estação móvel recebe os sinais e processa a informação.

**Diferença do tempo de chegada:** A diferença do tempo de chegada (TDoA - *Time Difference of Arrival*), utiliza duas ou mais estações e dispensa o tempo em que o sinal foi enviado, considerando, somente, a diferença de tempo em que as duas estações receberam o sinal e a velocidade de propagação que no ar é próxima de  $3 \cdot 10^8$  m/s.

Para esse procedimento pode-se utilizar a seguinte equação:

$$\Delta d = \sqrt{(x_2 - x)^2 + (y_2 - y)^2} - \sqrt{(x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2} \quad (2)$$

onde:  $(x_1, y_1)$  e  $(x_2, y_2)$  são as coordenadas das estações fixas e  $\Delta d$  a distância a ser calculada.

Através de um processo matemático de regressão linear esta equação pode ser convertida em uma hipérbole. Utilizando outras estações base e refazendo os cálculos outras hipérbolas são traçadas. Assim através da intersecção das linhas a posição da estação móvel é calculada [42].

**Ângulo de chegada:** O ângulo de chegada (AoA- *Angle of arrival*) é a técnica sugerida neste trabalho para determinação da direção do sinal da estação móvel. Basicamente, consiste na determinação do ângulo de incidência da frente de onda do sinal determinando assim a direção de propagação do sinal. Em uma situação de visada direta entre as estações e na ausência de multipercurso a determinação da posição da estação móvel é possível utilizando estações receptoras como ilustra a Fig. 4.6.



Fig. 4.6– Determinação da posição da estação móvel utilizando o AoA em duas estações.

O ponto negativo da técnica AoA é o efeito de multipercursos. Caso o sinal tenha chegado à estação receptora através de um caminho que não seja direto a medição do ângulo levará à um erro muito grande da posição verdadeira da estação móvel.

**Medição da intensidade do sinal:** A intensidade de sinal que chega ao receptor pode ser utilizada como técnica de localização. Os modelos atuais que determinam a atenuação podem ser teóricos como, por exemplo, o modelo Okumura-Hata ou empíricos [43]. Esses modelos são equações matemáticas que, entre outros parâmetros incluem a distância.

Os modelos teóricos mais precisos são baseados em testes em campo com medições da atenuação do sinal no enlace, atraso de propagação e outras características do canal. Estas informações são coletadas para se chegar às equações matemáticas que melhor representam os efeitos de propagação observados no local. Obviamente a urbanização e a topografia do local interferem e determinam as equações do modelo.

No modelo original de Okumura, feito em 1968, a medição dos sinais foram apresentadas em forma de curvas que posteriormente em 1980 foram transformadas em equações por Hata [43]. As equações apresentadas seguem as seguintes observações:

- As antenas são consideradas isotrópicas.
- O terreno é plano.
- A área urbana é o padrão, para demais condições deve-se aplicar um fator de correção.

A equação definida por Hata para atenuação foi [44]:

$$L = 69,55 + 26,16 \cdot \log_{10}(f) - 13,82 \cdot \log_{10}(h_t) - a(h_r) + (44,9 - 6,55 \cdot \log_{10}(h_t)) \cdot \log_{10}(d) \quad (3)$$

Onde:

$L$  = Atenuação em área urbana em dB.

$f$  = Frequência em MHz (entre os limites de 150 MHz e 1500 MHz).

$d$  = distância em Km (entre os limites de 1 Km à 20 Km).

$h_t$  = altura da antena do transmissor (entre os limites de 30 m e 200 m).

$a(h_r)$  = fator de correção em função da altura  $h_r$  da estação móvel.

$h_r$  = altura da antena da estação móvel (entre os limites de 1 m e 10 m).

O fator de correção para cidades pequenas e médias é:

$$a(h_r) = (1,1 \log_{10}(f) - 0,7) \cdot h_r - (1,56 \cdot \log_{10}(f) - 0,8) \quad (4)$$

fator de correção para cidades grandes é:

$$\begin{aligned} a(h_r) &= 8,29 \cdot (\log_{10} 1,54 \cdot h_r)^2 - 1,1 && \text{para } f < 300 \text{ MHz} \\ a(h_r) &= 3,2 \cdot (\log_{10} 11,75 \cdot h_r)^2 - 4,97 && \text{para } f < 300 \text{ MHz} \end{aligned} \quad (5)$$

Para áreas suburbanas a equação é modificada para:

$$L_{suburbanas} = L - 2 \left[ \log_{10} \left( \frac{f}{28} \right) \right]^2 - 5,4 \quad (6)$$

e para áreas rurais a equação é modificada para:

$$L_{rural} = L - 4,78 \cdot (\log_{10}(f))^2 + 18,33 \cdot \log_{10}(f) - 40,94 \quad (7)$$

Dependendo do tipo de transmissão outros modelos são utilizados como, por exemplo, as curvas de propagação definidas pelo Comitê Consultivo Internacional de Rádio (CCIR - *International Radio Consultive Committee*) [45], o modelo ITU-R P1546 recomendado pela ITU para transmissão de TV digital entre outros [46].

Nos sistemas de medição modernos é comum utilizar a Indicação da Intensidade de Sinal Recebido (RSSI – *Received Signal Strength Indication*) que é um valor representativo da intensidade de sinal presente no circuito de entrada de rádio frequência do receptor. Para determinação de modelos empíricos é realizada uma análise dos sinais no ambiente desejado, com essa informação um modelo é criado.

Como de uma forma geral a potência que chega ao receptor é função da distância, em uma transmissão com visada direta, conhecendo todos os parâmetros de transmissão e recepção como a potência do transmissor, o ganho das antenas e o comprimento de onda, é possível determinar a distância entre o receptor e o transmissor. Estes parâmetros são definidos pela equação de Friss [47][48].

$$P_r = P_t \cdot \frac{G_t G_r \lambda^2}{(4 \cdot \pi)^2 d^2} \quad (8)$$

Onde:

$P_r$  = intensidade do sinal recebido.

$P_t$  = potência do transmissor.

$G_t$  = ganho da antena do transmissor.

$G_r$  = ganho da antena do receptor.

$\lambda$  = comprimento de onda do sinal transmitido.

$d$  = distância entre o transmissor e o receptor.

**O sistema GPS:** Nos dias atuais a mais conhecida ferramenta de localização é o Sistema de Posicionamento Global (GPS - *Global Positioning System*). O GPS utiliza satélites de baixa órbita e a localização da estação receptora é determinada pelo tempo de chegada do sinal, ou seja, utilizando a técnica TOA [49]. Basicamente, a determinação é feita pela estação móvel da seguinte forma:

- a) Um satélite transmite sinais informando a posição atual no espaço, seus dados e um tempo preciso T1.
- b) A onda eletromagnética irradiada percorre a distância entre o satélite e a estação receptora à uma velocidade de  $3 \cdot 10^8$  m/s.
- c) O receptor recebe essas informações no tempo T2.
- d) Baseado na diferença entre os tempos T1 e T2 o sistema embarcado no receptor calcula a distância entre este e o satélite.
- e) Assim que o receptor consegue receber e calcular a distância de pelo menos 4 satélites sua posição no planeta fica determinada em três dimensões, ou seja, latitude, longitude e altitude.

A Fig.4.7 ilustra o processo de determinação da distância entre o satélite e a estação móvel utilizada pelo sistema GPS.



Fig. 4.7– Determinação da distância entre o satélite e a estação móvel no sistema GPS.

O sistema de localização por GPS, no entanto, está sujeito à bloqueios provocados por obstáculos físicos como prédios e outras edificações que muitas vezes também provocam erros no sistema de localização pelo efeito de multipercurso.

**RADAR:** O sistema de detecção e avaliação de distância via rádio (*RADAR-Radio Detection And Ranging*) foi inventado antes da primeira guerra mundial, porém foi durante as duas grandes guerras que teve seu desenvolvimento consolidado como um método confiável de detecção de objetos. O princípio de funcionamento é baseado na emissão de pulsos eletromagnéticos (ondas de rádio) que são refletidos pelos objetos sendo recebidos pelo receptor localizado na própria estação transmissora [50]. Existem vários tipos de radares, alguns destinados à detecção de presença de aeronaves, destinados à detecção de mísseis balísticos como é o caso de radares além do horizonte (*OTH - Over The Horizon*), destinados à meteorologia e outras aplicações. A Fig. 4.8 ilustra a teoria de funcionamento deste sistema que pode ser utilizado como sistema de localização.

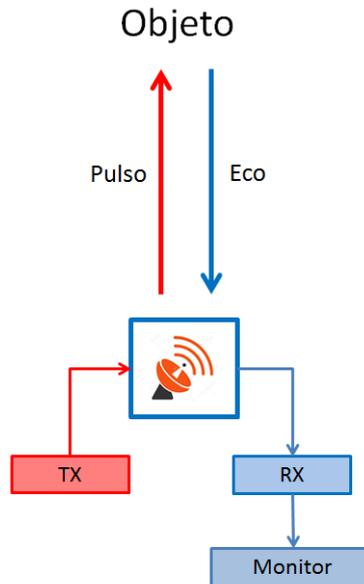


Fig. 4.8– Princípio básico de funcionamento do radar.

### Considerações finais

Levando-se em conta todas as técnicas de determinação da direção do sinal e da determinação da localização já existentes bem como a necessidade de técnicas de gerenciamento modernas aplicadas à tecnologia 5G, este trabalho apresenta uma técnica auxiliar de gerenciamento baseado na direção do sinal de chegada. Apesar de qualquer técnica de localização ou determinação da direção do sinal atender aos propósitos deste trabalho, a técnica do ângulo de chegada foi escolhida por ser aplicada à uma única estação isolada, ou seja, sem a necessidade da utilização da técnica de triangulação. O funcionamento do sistema como um todo está descrito no Capítulo seguinte.

## 5 – O SISTEMA PROPOSTO

### 5.1 – Introdução

Como já discutido anteriormente, para prover uma comunicação sem interrupções do dispositivo móvel com as estações base é necessário um sistema de rastreamento capaz de realizar a mudança de célula quando a unidade móvel passa de um setor para outro. Na tecnologia LTE utilizada pelas redes atuais de quarta geração (4G), este rastreamento e controle é realizado pela Entidade de Gerenciamento Móvel (MME). Quando a unidade móvel se aproxima dos limites da área de atuação de uma célula, a MME envia comandos para todas as estações vizinhas solicitando que estas enviem sinais para a estação móvel verificando, assim, para qual célula a estação móvel está se deslocando. A Fig. 5.1 ilustra essa comunicação.

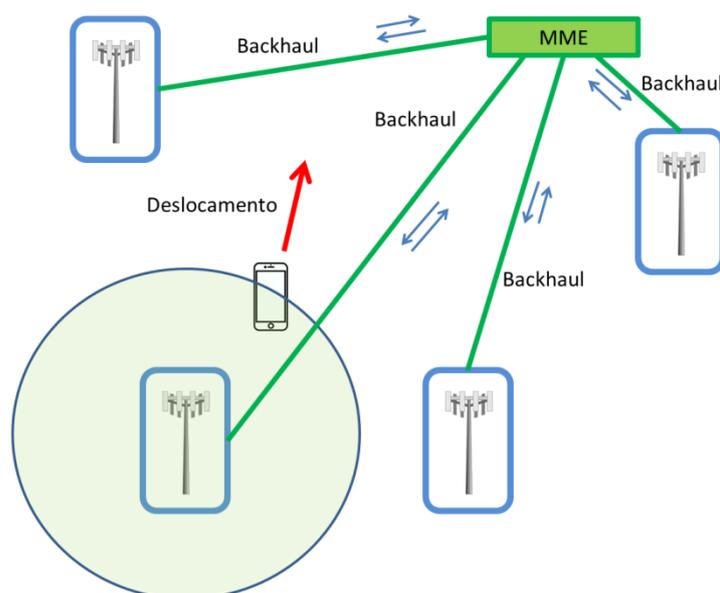


Fig. 5.1 – Solicitação enviada às estações pela MME para localização da estação móvel.

Como é possível visualizar na Fig. 5.1 a MME utiliza o canal de comunicação na parte final da rede (*Backhaul*) de todas as estações envolvidas na mudança de célula (*Handover*) para localizar a estação móvel. A tecnologia LTE mudou a maneira tradicional da rede funcionar, sua tecnologia é totalmente digital e é baseada na transmissão de pacotes e não por chaveamento de circuitos, como ainda existem em operação sistemas com tecnologia 2G, 3G e outras, o gerenciamento da mudança de célula é bastante complexo. É exigido pelos

sistemas atuais uma alta qualidade de serviço, não sendo aceitável uma interrupção da comunicação durante uma mudança de célula. Para realização dessa tarefa a Mudança de Célula do LTE (*LTE Handover*) é feita de duas maneiras [51]:

- Controlado pela rede: A rede toma a decisão do *handover*.
- Avaliado pelo móvel: A unidade móvel escolhe a estação base, porém a decisão final é do gerenciamento da rede que avalia a disponibilidade de recursos.

Como várias tecnologias estão em uso, o *handover* pode ser realizado de três formas: Intra LTE, Inter LTE e Inter RAT.

**Intra LTE Handover:** A mudança de célula chamada *Intra LTE Handover* ocorre entre células da mesma unidade de controle MME com tecnologia LTE. Existem duas formas que essa mudança pode ocorrer, quando existe uma interface entre as estações eNodeB chamada de X2 o *handover* é realizado sem a participação do núcleo da rede, ou seja, sem a decisão da MME. Quando esta ligação não existe a decisão do *handover* é tomada pela MME através da interface S1. A Fig. 5.2 mostra a ligação entre as estações base eNodeB e a MME.

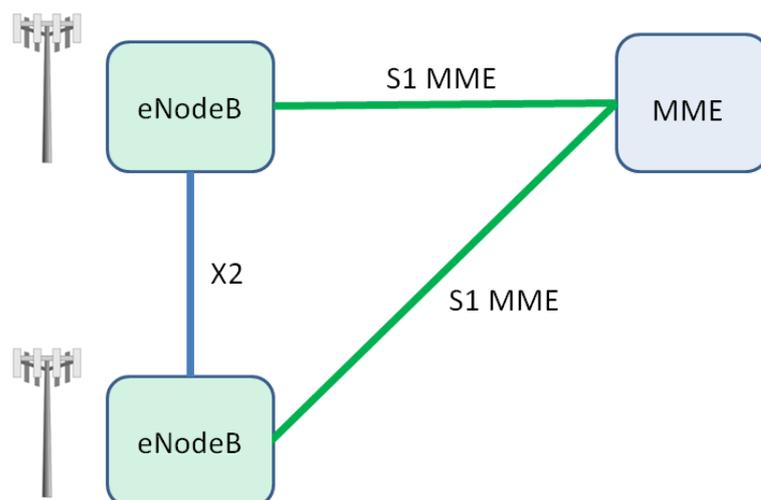


Fig. 5.2 – Comunicação entre as estações eNodeB e MME.

**Inter LTE Handover:** A mudança de célula *Inter LTE* ocorre entre células controladas por diferentes unidades MME. A Fig. 5.3 mostra os principais componentes envolvidos neste tipo de *handover*.

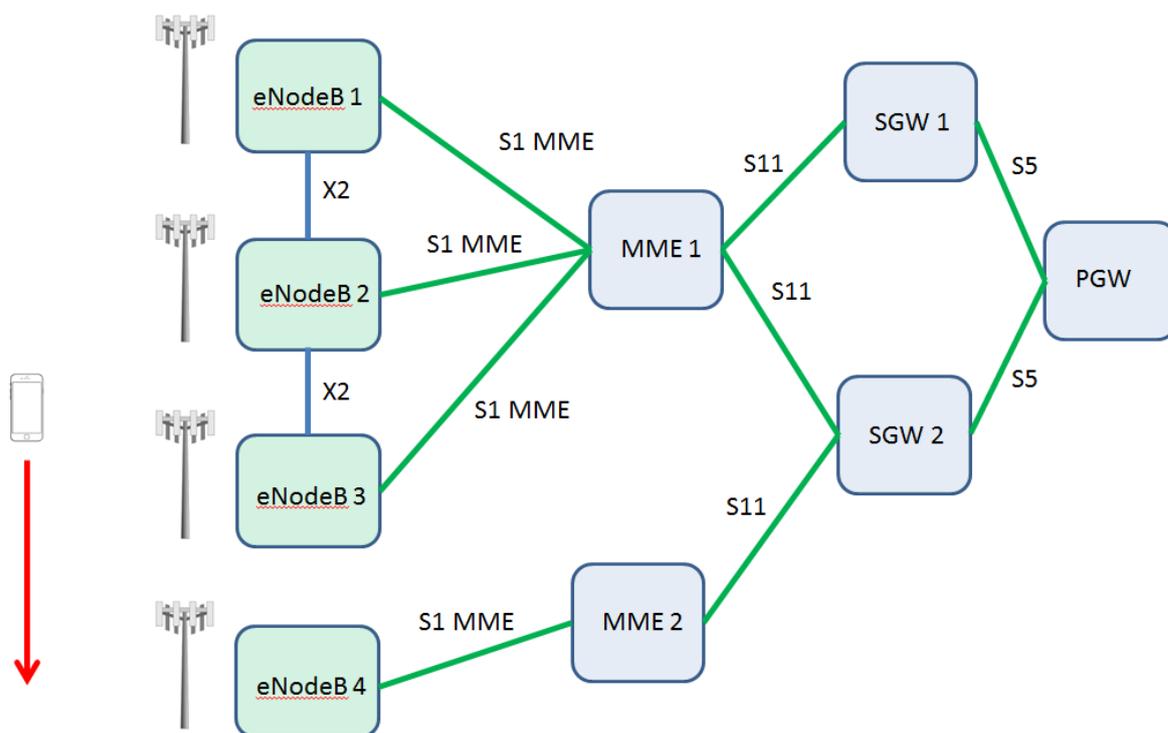


Fig. 5.3 – Principais dispositivos envolvidos em uma mudança de célula Inter LTE.

Primeiramente, é importante observar que não existe comunicação do tipo X2 entre o eNodeB4 e o eNodeB3 onde se encontra inicialmente a estação móvel. O S-GW que faz o roteamento entre os pacotes de dados do sistema também gerencia a mobilidade neste processo de *handover*. A Porta de Acesso à Rede de Pacotes de Dados (P-GW - *Packet Data Network Gateway*) permite a conexão com a rede externa, sendo este o nó de entrada e saída dos dados do usuário. Uma MME pode estar ligada à vários S-GW e a mudança de célula nesta situação é controlada pelas S-GWs. A mudança pode ser no mesmo S-GW (Inter MME) ou de um S-GW para outro (Inter MME/S-GW) [52].

**Inter RAT:** A mudança de células com Tecnologias de Acesso via Rádio (RAT - *Radio Access Technology*) diferentes é denominada mudança de célula Inter RAT. Como exemplo, quando uma estação móvel sai da área de cobertura de uma rede 3G LTE e entra em uma área de cobertura com tecnologia 2G. Os procedimentos de mudança devem estar de acordo com as tecnologias envolvidas. A Fig. 5.4 ilustra esse cenário.

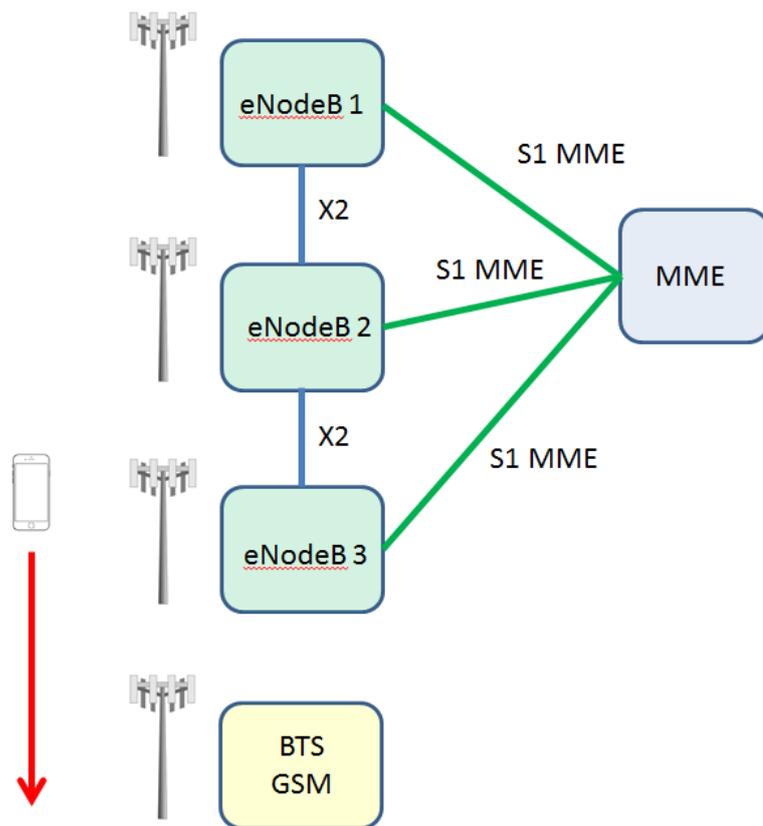


Fig. 5.4 – Mudança de célula com tecnologias diferentes.

## 5.2 – O sistema de controle proposto

Este trabalho propõe a utilização de duas ou mais antenas trabalhando como localizador no modo de ângulo de chegada (AoA) como descrito no item 5.1 deste trabalho. Neste sistema proposto o sinal transmitido por uma estação móvel é recebido pelo sistema de localização que converte o ângulo de chegada em sinal digital. Baseada nessa informação e pelo teorema da reciprocidade das ondas eletromagnéticas a MME ajusta os ângulos de fase dos transmissores do arranjo de antenas e envia os sinais na direção da estação móvel. O ajuste de fase e a transmissão são realizados de forma individualizada para cada estação. A

Fig. 5.5 ilustra este sistema.

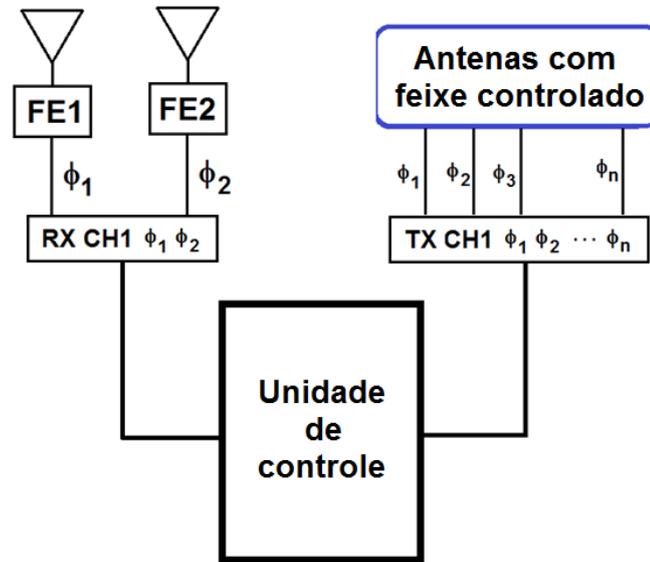


Fig. 5.5– Controle de direcionamento individual de estação móvel.

Desta forma, a transmissão dos sinais para cada estação móvel é realizada ajustando os passos de fase das correntes nos transmissores baseada na direção do sinal recebido pelo sistema de localização. O sistema proposto completo possui uma unidade de controle que armazena uma lista de estações móveis e suas respectivas posições. A Fig. 5.6 mostra as antenas de recepção com seus respectivos amplificadores de sinais (FE1 e FE2), a unidade de controle com a informação do ângulo de chegada do sinal de cada estação, os ângulos de ajuste para irradiação na direção de cada estação móvel e o conjunto de antenas que são alimentados com um passo regular de fase de corrente.

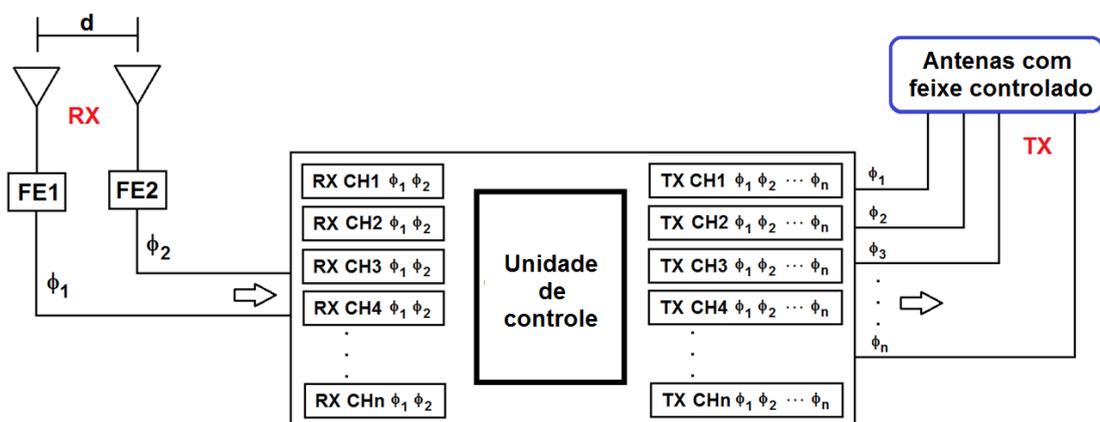


Fig. 5.6– Controle de localização e direcionamento completo da estação base.

Como a direção da irradiação pode ser ajustada, a potência pode ser controlada aumentando o alcance em determinadas direções e reduzindo interferência entre células vizinhas e no sistema como um todo. Como exemplo deste controle, considere o cenário mostrado na Fig. 5.7.

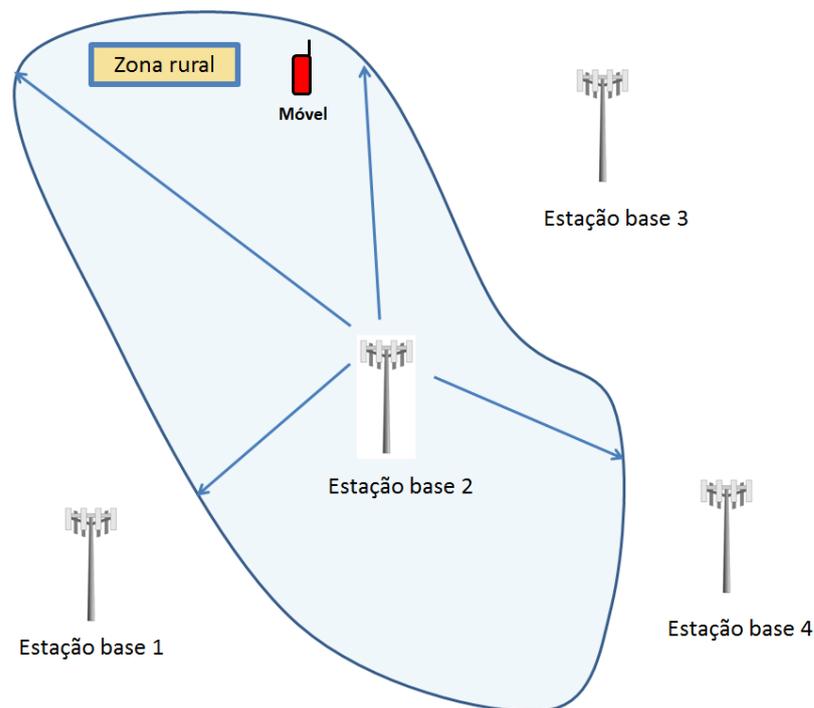


Fig. 5.7– Diagrama de irradiação controlado por software.

Neste exemplo a estação base 2 reduz a potência quando irradia na direção das estações vizinhas e aumenta a potência quando irradia em direção à zona rural. Este controle pode ser implementado em software correlacionando a potência com o ângulo de transmissão.

### 5.3 – A área de cobertura definida por software

Com o objetivo de concentrar a máxima irradiação na direção da estação móvel este trabalho propõe a utilização de um arranjo de antenas ou da utilização das já utilizadas antenas MIMO [35]. Estas estruturas possibilitam um ganho de sinal e conseqüentemente uma

direcionalidade controlada. Um conjunto de elementos irradiantes idênticos excitados por correntes com fases e amplitudes controladas podem concentrar o feixe de sinal em uma direção específica produzindo o chamado ajuste de feixe (*beamforming*) como ilustra a Fig. 5.8.

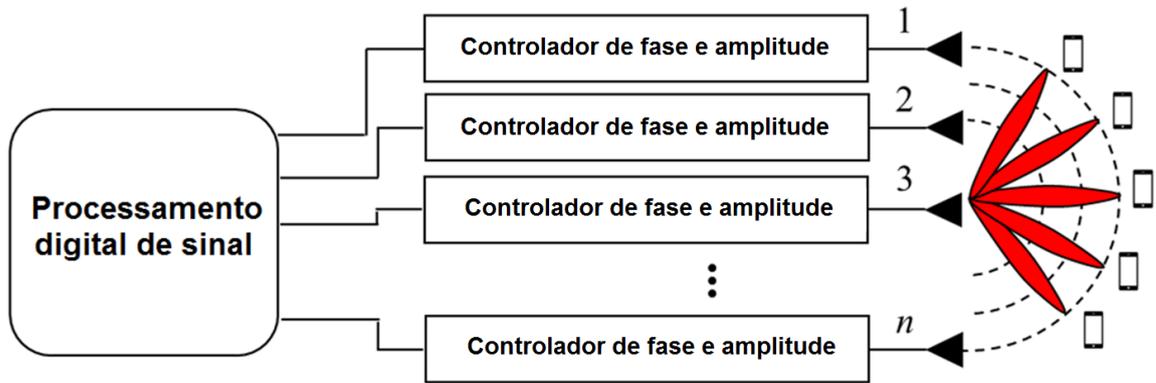


Fig. 5.8– Conjunto de antenas e transmissores produzindo feixes de sinais controlados.

Para maior simplicidade de controle, é usual manter um mesmo distanciamento de cada elemento do conjunto onde cada elemento é alimentado com um sinal de mesma amplitude e correntes com incrementos de fase regularmente espaçados de  $\xi$  graus. O diagrama de irradiação resultante é o produto da equação da irradiação característica de cada elemento isolado pela equação do conjunto [53].

$$E_{total}(\theta, \phi) = F(\theta, \phi) \frac{\sin(Nks \cos(\theta) + \xi)}{N \sin(ks \cos(\theta) + \xi)} \quad (16)$$

onde:

$F(\theta, \phi)$  = equação que define a irradiação de um único elemento do conjunto.

$\theta, \phi$  = ângulos em coordenadas polares.

$N$  = número de elementos do conjunto.

$k = 2\pi/\lambda$  sendo  $\lambda$  o comprimento de onda do sinal.

$\xi$  = passo de fase de corrente de alimentação dos elementos.

$s$  = distância em relação à antena.

$\theta$  = ângulo em relação à antena.

Desta forma é possível controlar a intensidade de sinal irradiado em uma direção específica ajustando o passo do ângulo das correntes nos pontos de alimentação. Em sistemas

com multiplexação por divisão de frequência ocupando uma ampla largura de faixa, um fator de correção deve ser aplicado para corrigir as fases dos sinais em cada frequência quando a precisão do ângulo for elevada.

## 5.4 – A diminuição do tráfego

Definida na Release 8 da 3GPP a MME (*Mobility Management Entity*) tem, entre outras funções, a tarefa de alocar recursos dinamicamente para uplink (sentido móvel para base) e *downlink* (sentido base para móvel) possibilitando a comunicação sem interrupções da unidade móvel com as estações base. Esta nova concepção da rede, que é considerada a quarta geração da telefonia móvel celular (4G) é totalmente diferente da tecnologia anterior pois é totalmente baseada no protocolo IP (*Internet Protocol*) e trabalha com comutação de pacotes de dados e não com comutação de circuitos onde o usuário do sistema alocava um canal de comunicação.

Na rede comutada por pacotes não existe reserva de recursos aos usuários, o meio é compartilhado e os pacotes são encaminhados nó à nó não sendo garantido a chegada dos mesmos. Na comunicação por circuitos o usuário utilizava um meio físico dedicado à sua conexão e requeria uma inicialização e um término da ligação. A Fig. 5.9 ilustra a diferença entre uma rede comutada por circuitos e uma rede comutada por pacotes.

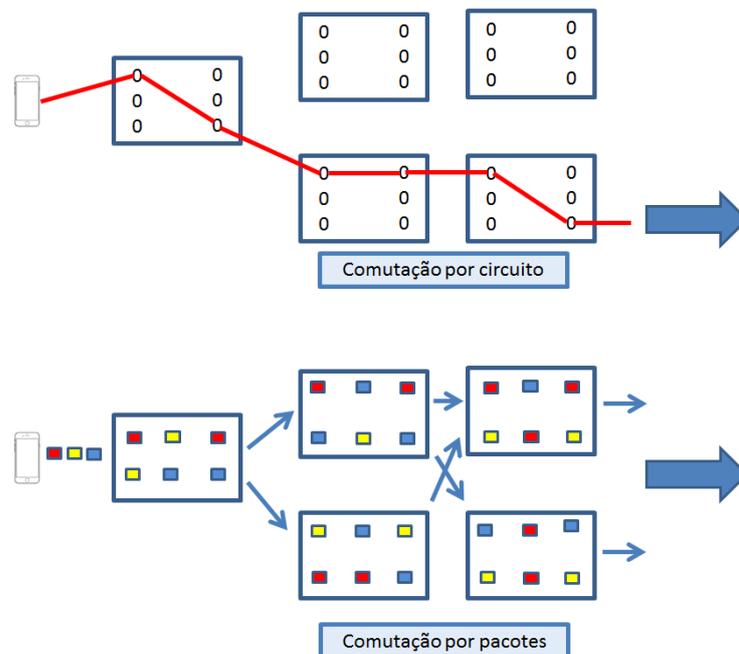


Fig. 5.9 – Envio dos dados por comutação por circuito e comutação por pacotes.

As estações base nessa nova concepção de rede passou a ser chamada de eNodeB sendo o conjunto dessas eNodeBs denominada E-UTRAN (*Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network*). A Fig. 5.10 ilustra a ligação entre as estações eNodeBs e as MMEs.

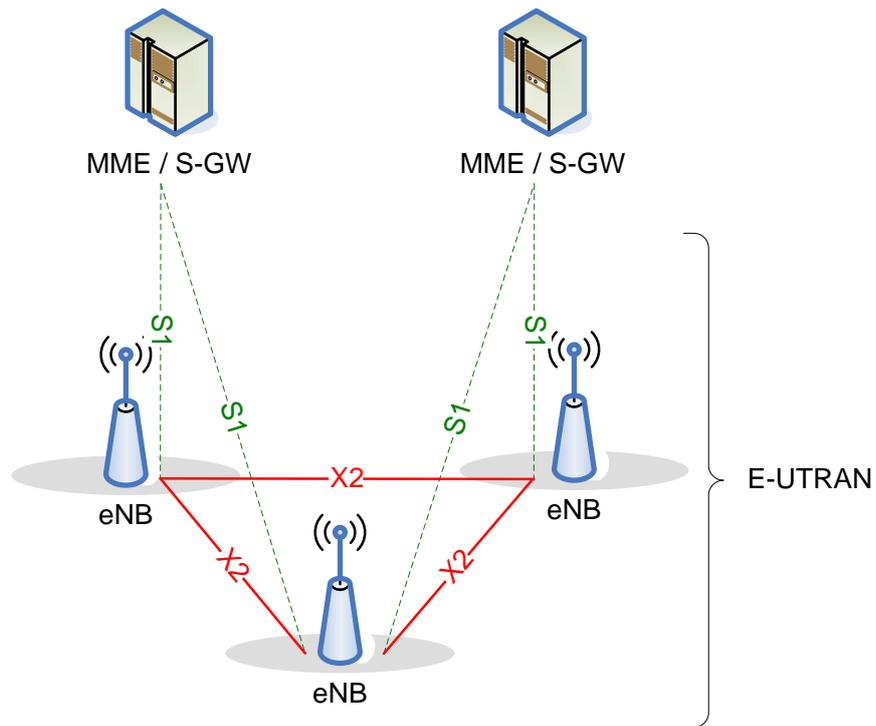


Fig. 5.10 – Interligação entre as eNBs e EPC (MME/S-GW)[10]

Como é possível ver na Fig. 5.10 existe uma comunicação entre as estações eNodeB através de uma interface chamada X2. Um eNodeB pode realizar uma mudança de célula através dessa comunicação. A Fig. 5.11 ilustra a sequência de eventos para essa mudança.

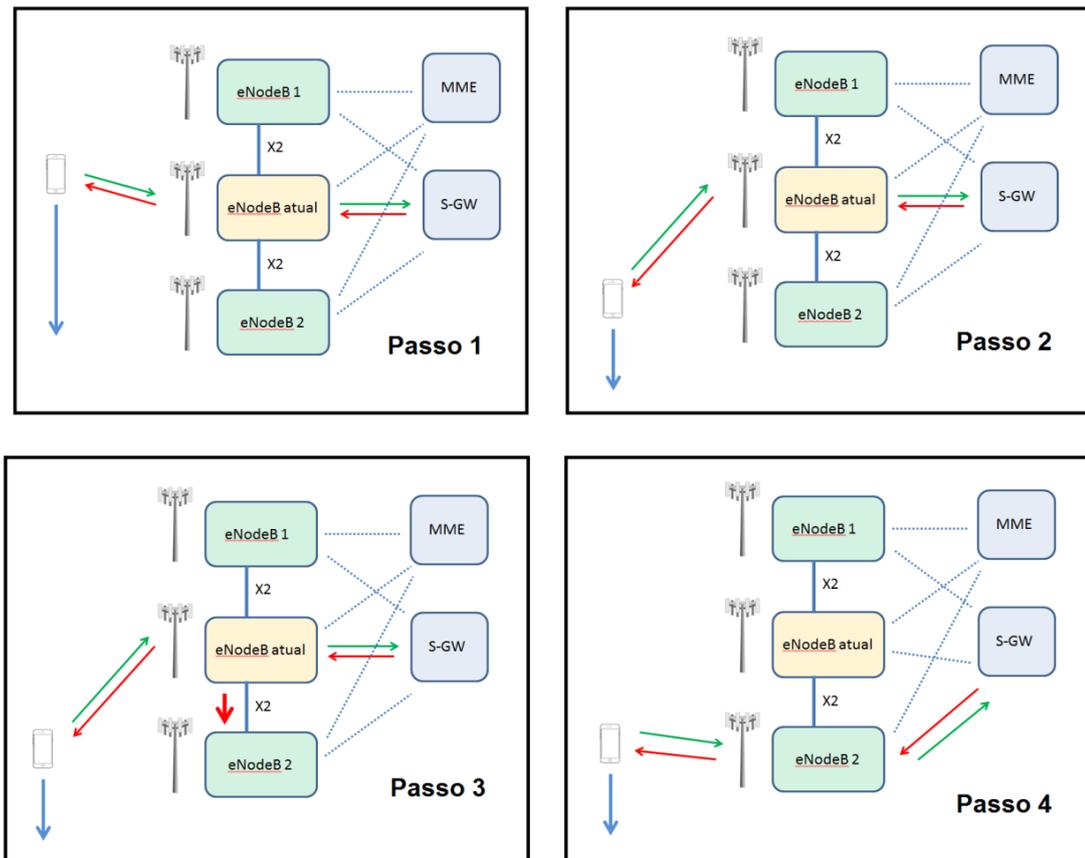


Fig. 5.11 – Mudança de célula utilizando interface X2.

Um resumo dos passos desse tipo de *handover* é:

Passo 1: A estação móvel recebe as informações dos limiares de recepção da estação eNodeB e passa a monitorar os sinais.

Passo 2: Com a mudança de posição a qualidade do serviço do eNodeB 2 passa a ser melhor que a do eNodeB atual.

Passo 3: O eNodeB atual envia uma requisição de *handover* para o eNodeB 2 passando as informações sobre a estação móvel através da interface X2.

Passo 4: A estação móvel passa a ser controlada pelo eNodeB 2.

Quando não há ligação entre as estações base eNodeB através da interface X2 o *handover* é gerenciado pela MME. A Fig. 5.12 mostra esse cenário.

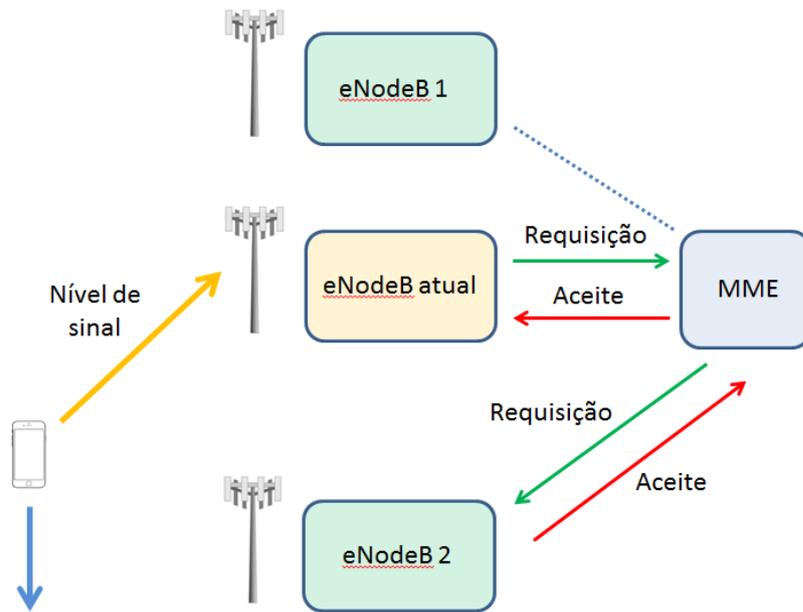


Fig. 5.12 – Mudança de célula utilizando os recursos da MME.

Neste processo de mudança de célula, a MME recebe a requisição de *handover* e gerencia o processo. Em nenhum dos casos existe uma previsão de mudança, a conexão com a nova estação base eNodeB ocorre após a determinação da melhor qualidade de serviço nas vizinhanças da estação base atual.

É previsto para a nova tecnologia 5G uma densidade de estações por quilômetro quadrado muito acima da rede atual, portanto é esperado um elevado número de mudança de célula gerando um elevado tráfego de dados na *backhaul* (conexão de dados na proximidade do usuário final). Com um elevado número de estações base por quilômetro quadrado o cenário ilustrado na Fig. 1.1 deste trabalho facilmente poderá ocorrer. Como no exemplo dado anteriormente a estação móvel se encontra na célula denominada A e está indo em direção à célula C como mostra a Fig. 5.13.

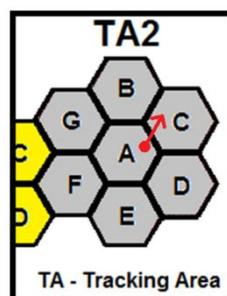


Fig. 5.13 – Mudança de célula em uma área com alta densidade de estações base.

Se nenhum mecanismo de localização for utilizado a estação base eNodeB A terá somente a informação que a intensidade do sinal da estação móvel está chegando no limiar definido e terá que enviar uma solicitação de monitoramento do sinal para todas as estações nas proximidades (neste exemplo todas as seis estações de B à G).

Utilizando a técnica de localização proposta neste trabalho a estação base eNodeB A terá a informação que a estação móvel está nas proximidades das estações B, C e D podendo enviar a solicitação de monitoramento do sinal somente para essas estações, reduzindo assim o tráfego no *backhaul*. A Fig.5.14 ilustra a informação obtida pela estação base eNodeB A com a utilização da técnica AoA já considerando erros pequenos de multipercuso.

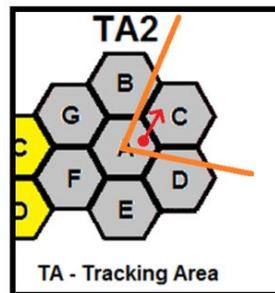


Fig. 5.14 – Direção estimada da estação móvel considerando pequeno erro de multipercuso.

Cabe salientar que, por triangulação a posição exata e o sentido do deslocamento da estação móvel podem ser determinados como explicado no item 4.3 deste trabalho. Um benefício adicional a ser considerado é o grande avanço do sistema de localização LCS criado desde a versão inicial da telefonia móvel com a Release 99 que, com esse sistema avançado de localização pode melhor servir aos seus propósitos que são o auxílio em situações de emergência e aos propósitos comerciais como oferecimento de serviços de restaurantes, postos de combustíveis entre outros.

## 5.5 – Análise do efeito de multipercuso

Em uma área aberta sem obstáculos é relativamente simples determinar a direção de uma estação transmissora baseado no ângulo de chegada do sinal em duas antenas como demonstrado anteriormente neste trabalho. Entretanto, na presença de diferentes tipos de obstáculos os sinais transmitidos podem ser bloqueados ou podem sofrer desvios produzindo um efeito de multipercuso. A Fig. 5.15 ilustra um possível cenário.

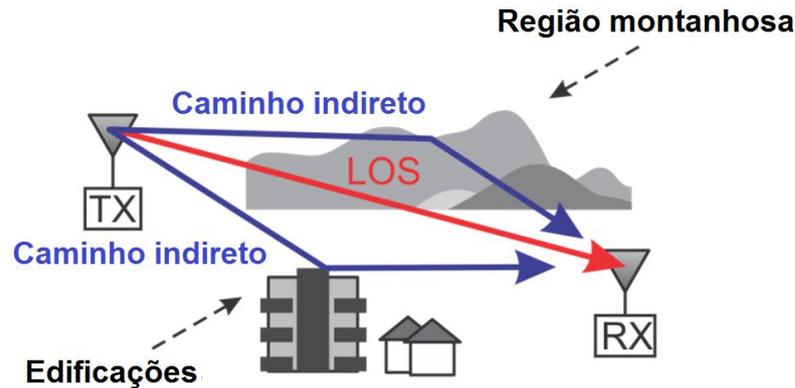


Fig. 5.15– Três sinais sendo recebidos caracterizando multipercursos.

Como os sinais se propagam por diferentes caminhos e distâncias, os sinais chegam com a mesma informação ao receptor, porém com diferença de fase e de amplitude. De uma forma geral um sinal de impulso através de um canal com propagação em multipercursos em um determinado tempo  $t$  pode ser caracterizado por [54]:

$$h(t) = \sum_{i=1}^L a_i \xi_i(t - \tau_i) \quad (17)$$

onde:

$a_i$  = amplitude do sinal no caminho  $i$ .

$\Sigma(i=1, \dots, L)$  = componentes da onda em multipercursos.

$\tau_i$  = o retardo do sinal no caminho  $i$ .

$\xi_i(\cdot)$  = função que caracteriza a distorção do pulso no caminho  $i$ .

Está claro que o efeito de multipercursos cria uma indeterminação da posição da estação transmissora, a função que caracteriza a distorção  $\xi_i(\cdot)$  varia com o percurso, porém é possível obter algumas informações importantes:

- O tempo de chegada de um sinal direto é menor que qualquer outro sinal em outro percurso.
- O maior sinal (linha reta) mostrado na Fig. 5.15 é um sinal de visada direta LOS (*Line of Sight*).

Desta forma, é possível determinar a correta direção da estação móvel mesmo com a presença dos sinais em multipercursos, porém, isso nem sempre é possível. Como mostra a

Fig. 5.16, existem situações em que o sinal em visada direta LOS não está presente e a medição do ângulo de chegada leva à um grande erro de determinação da direção da estação móvel.

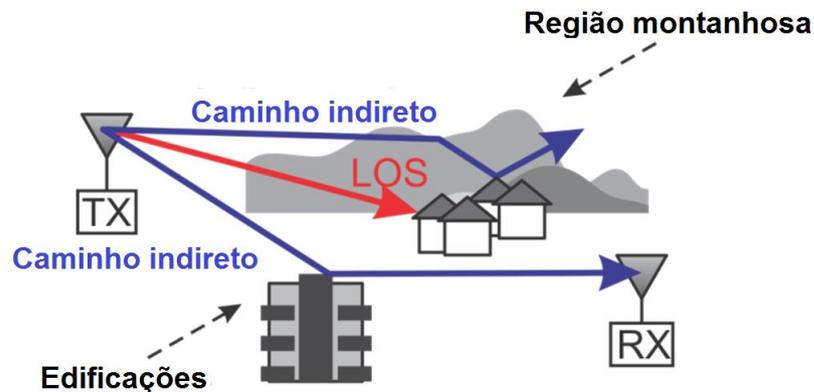


Fig. 5.16– Sinal em visada direta bloqueado.

Para evitar um erro na determinação da posição da estação móvel as técnicas descritas no Capítulo 4 e outras técnicas de localização baseadas em software podem ser aplicadas. No artigo “*Indoor Multipath Assisted Angle of Arrival Localization*” de 2017 dos autores S. Wielandt e L. Strycker [55] aplicam uma técnica baseada no ângulo de chegada que utiliza o efeito multipath como auxiliar no processo de localização da estação transmissora.

Independentemente disso, analisando esse cenário para o sistema proposto, isso pode ser um fator indesejável porém não representa um problema em potencial levando-se em consideração os seguintes pontos:

- Um dos principais objetivos do sistema é o controle da irradiação do sinal na direção da estação móvel, seja por multipercurso ou não, o ângulo do sinal de maior intensidade determinará o melhor ângulo de irradiação.

- Irradiando na direção determinada, mesmo que esta não seja a direção verdadeira da estação, haverá uma redução das interferências dentro do sistema devido ao controle do feixe e da potência irradiada pela estação base.

- A MME ainda poderá estimar um *handover* (mudança de célula) como descrito no item 5.7 deste trabalho, pois com as informações do ângulo medido e a subsequente mudança de célula o sistema pode, depois de um determinado tempo, prever futuras mudanças. Isso é possível através do registro de mudanças ocorridas. Se unidades móveis em um determinado ângulo mudarem para uma determinada célula, o mesmo deve ocorrer com as demais estações móveis naquele ângulo.

## 6 – ENSAIOS LABORATORIAIS DO SISTEMA DE DIREÇÃO

### 6.1 – A preparação do experimento

A técnica para determinação do ângulo de chegada AoA descrita no Item 4.3 deste trabalho pode ser aplicada às redes de telefonia móvel celular. Neste trabalho, para simplificação dos ensaios e obtenção de um diagrama de irradiação próximo da antena isotrópica (antena fictícia que possui a propriedade de irradiar com igual intensidade em todas as direções) foram utilizadas antenas dipolo. O sistema de localização utilizado é formado por duas antenas dipolo ajustadas para a frequência de 900 MHz, como mostra a Fig. 6.1.

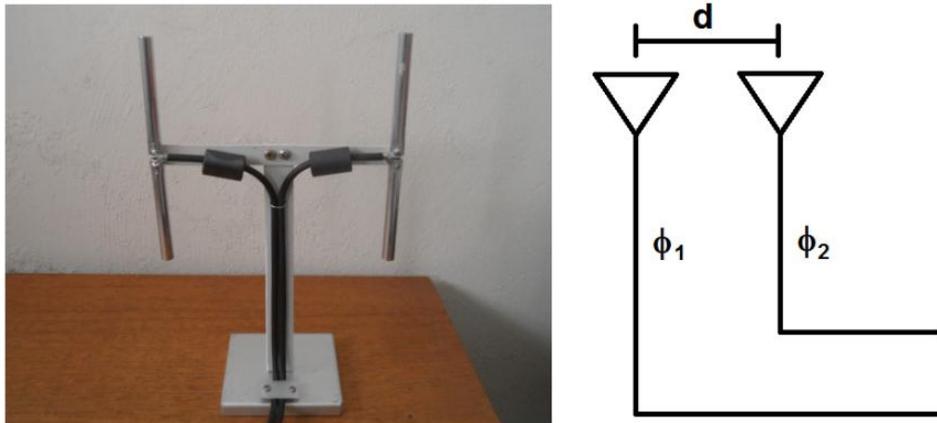


Fig. 6.1– Antenas dipolos utilizadas para recepção dos sinais.

O diagrama de irradiação em um plano perpendicular ao centro do dipolo é igual ao da antena isotrópica. Como o sistema proposto deve trabalhar com antenas direcionais serão realizadas medições entre os ângulos  $0^\circ$  e  $180^\circ$ .

Considerando a propagação no espaço livre, os sinais que chegam à Antena 1 e à Antena 2 podem, matematicamente, serem descritos por [47] :

$$\begin{aligned} E_1 &= E_o e^{i(\omega t - \beta r_1)} \cdot f(\Theta_d, \phi_d) \\ E_2 &= E_o e^{i(\omega t - \beta r_2)} \cdot f(\Theta_d, \phi_d) \end{aligned} \quad (9)$$

Onde:

$f(\Theta_d, \phi_d)$  = função do diagrama de irradiação de cada elemento.

$\Theta_d, \phi_d$  = ângulos em coordenadas polares do diagrama de irradiação.

$E_o$  = valor máximo do campo elétrico da onda.

$e$  = base do logaritmo neperiano.

$\omega$  = velocidade angular da onda.

$t$  = variável tempo.

$\beta = 2\pi/\lambda$  sendo  $\lambda$  o comprimento de onda do sinal.

$r_1$  = distância entre o transmissor e a antena 1.

$r_2$  = distância entre o transmissor e a antena 2.

Quando a estação móvel se encontra na linha perpendicular ao plano formado pelas antenas (em coordenadas polares na posição  $\Theta = 90^\circ$ ) os sinais estão equidistantes das duas antenas e chegam rigorosamente em fase. Nessa situação os sinais nas duas antenas possuem a mesma amplitude e a diferença de fase entre eles é zero. Quando a posição da estação móvel forma um ângulo diferente de  $90^\circ$  com relação à linha perpendicular ao plano formado pelos dipolos a diferença de fase entre os sinais nas antenas é diferente de zero. A Fig. 6.2 ilustra esta configuração.

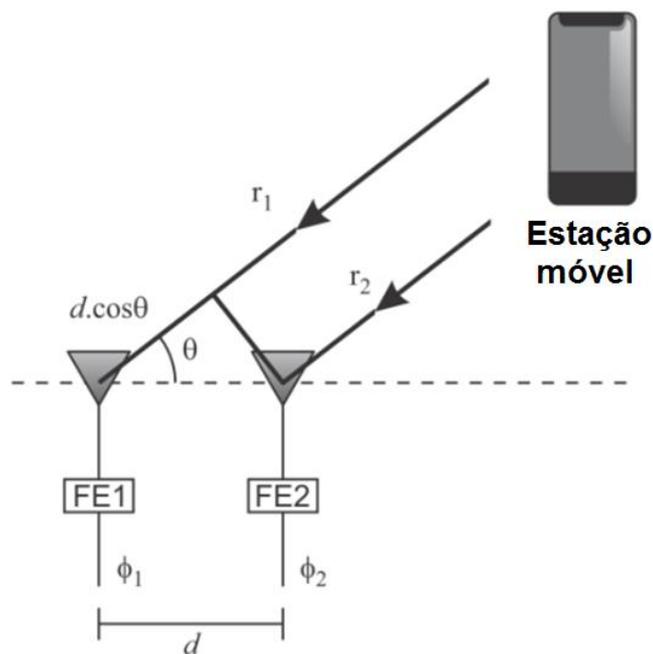


Fig. 6.2– Posição da estação móvel em relação às antenas do sistema.

Na Fig. 6.2 os blocos FE1 e FE2 representam amplificadores de sinais (*Front End*) e é possível observar que o sinal que percorre o caminho indicado por  $r_1$  chegando à Antena 1 (antena da esquerda) terá um retardo de fase, por percorrer uma distância maior que a distância  $r_2$ . A distância  $r_1$  em função da distância  $r_2$  é dada por:

$$r_1 = r_2 + d \cos(\Theta) \quad (10)$$

Sendo  $d$  a distância entre as antenas e  $\Theta$  o ângulo de chegada dos sinais. A corrente induzida na Antena 2 é dada por:

$$I_2 = I_o e^{i(\omega t - \beta r_2)} \cdot f(\Theta_d, \phi_d) \quad (11)$$

$I_o$  é a máxima amplitude da corrente no terminal da Antena2. A corrente induzida na Antena 1 é:

$$\begin{aligned} I_1 &= k \cdot I_o \cdot e^{j(\omega t - \beta(r_2 + d \cdot \cos(\Theta)))} \cdot f(\Theta_d, \phi_d) \\ I_1 &= k \cdot I_o \cdot e^{j(\omega t)} \cdot e^{j(-\beta r_2 - \beta d \cos(\Theta))} \cdot f(\Theta_d, \phi_d) \\ I_1 &= k \cdot I_o \cdot e^{j(\omega t - \beta r_2)} \cdot e^{-j(\beta d \cos(\Theta))} \cdot f(\Theta_d, \phi_d) \\ I_1 &= k \cdot I_2 \cdot e^{-j(\beta d \cos(\Theta))} \end{aligned} \quad (12)$$

onde:

$k$  = fator de atenuação devido ao incremento da distância.

$I_1$  = Corrente induzida na antena 1.

$I_2$  = Corrente induzida na antena 2.

$\beta = 2\pi/\lambda$  sendo  $\lambda$  o comprimento de onda do sinal.

$d$  = distância entre as antenas.

$\Theta$  = ângulo de chegada do sinal.

A diferença de fase entre as correntes  $I_1$  e  $I_2$  é  $\beta \cdot d \cdot \cos(\theta)$ . Logo, pode-se definir a relação entre as diferença de fase das correntes nas antenas ( $\phi_1, \phi_2$ ) e o ângulo formado pelos sinais da estação móvel em relação à linha perpendicular ao plano formado pelos dipolos ( $\Theta$ ). Esta relação é dada por:

$$\begin{aligned}\phi &= \phi_1 - \phi_2 \\ \phi &= \beta \cdot d \cdot \cos(\theta)\end{aligned}\quad (13)$$

onde:

$\phi_1$ =Fase da corrente induzida na antena 1.

$\phi_2$ =Fase da corrente induzida na antena 2.

$\phi$  =Diferença de fase das correntes.

$\beta = 2\pi/\lambda$  sendo  $\lambda$  o comprimento de onda do sinal.

$d$  = distância entre as antenas.

$\theta$  = ângulo de chegada do sinal.

Assim, através da medição da diferença de fase entre as correntes induzidas nos dipolos pode-se determinar com precisão o ângulo de chegada dos sinais emitidos pela estação móvel. Para obter a máxima resolução, a distância entre as antenas precisa ser ajustada de maneira que um sinal de chegada de  $-90^\circ$  à  $90^\circ$  produza uma diferença de fase das correntes induzidas de  $-180^\circ$  à  $180^\circ$ , ou seja:

$$\begin{aligned}-180 &< \beta \cdot d \cdot \cos(\theta) < 180 \\ \pi &> |\beta \cdot d \cdot \cos(\theta)|\end{aligned}\quad (14)$$

Considerando os limites  $\cos(\theta)=1$  e  $\cos(\theta)=-1$

$$\begin{aligned}\pi &= \frac{2\pi}{\lambda} \cdot d \\ d &= \frac{\lambda}{2}\end{aligned}\quad (15)$$

Esta é a condição de máxima resolução do sistema sendo este o máximo valor de distância  $d$  permitido.

Para ensaiar o sistema de localização proposto e comprovar seu funcionamento, dois dipolos com 158 mm de comprimento espaçados de 166 mm ( $d=\lambda/2$ ) foram montados com o objetivo de serem utilizados como receptores no sistema de localização como mostrado na Fig. 6.1. Um terceiro dipolo com o mesmo comprimento foi utilizado como sistema irradiante simulando os sinais irradiados por uma estação móvel. A Fig. 6.3 mostra a configuração utilizada nos testes com as duas antenas de recepção (RX) e a antena de transmissão (TX). Os

toróides que aparecem junto às antenas foram utilizados para evitar a irradiação em modo comum [56] evitando assim perturbações nos resultados. Apesar da proximidade a distância entre as antenas é bem superior à vários comprimentos de onda podendo assim ser considerada como uma medição em campo distante [47][48].

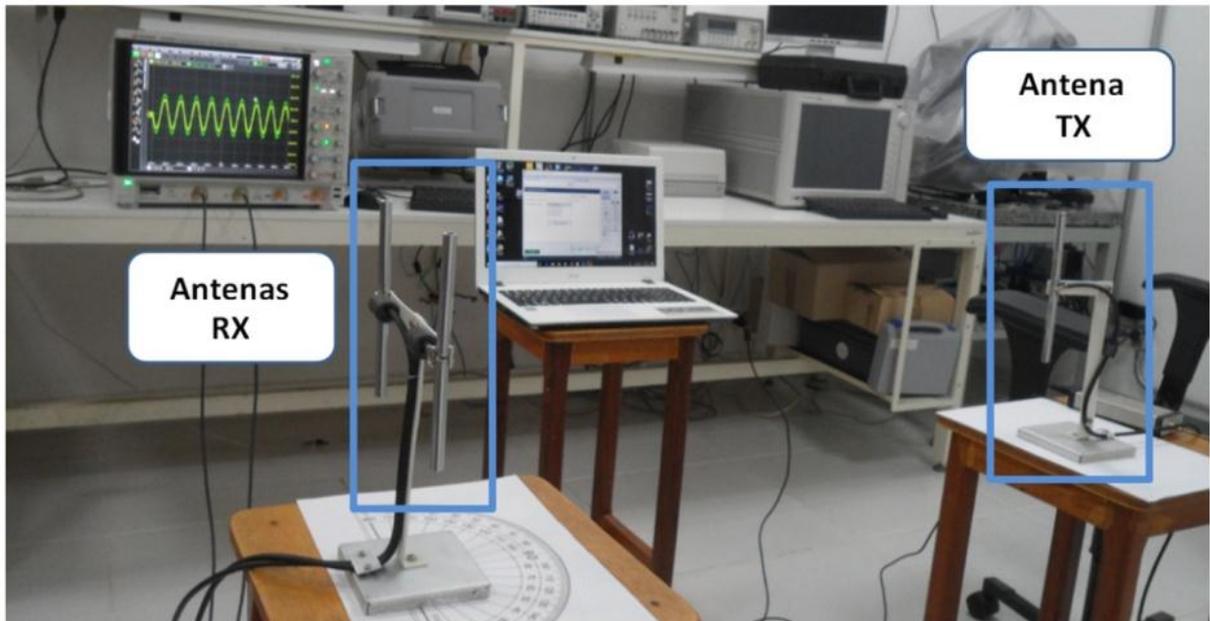


Fig. 6.3– Montagem das antenas e equipamentos do laboratório.

## 6.2 – A eliminação dos sinais interferentes

Dado as inevitáveis interferências eletromagnéticas, na grande maioria das vezes não é possível fazer observações de sinais específicos através de um osciloscópio ligado diretamente à antena. Na fig. 6.4 podemos ver os sinais interferentes apresentados por um osciloscópio ligado à uma antena dipolo.

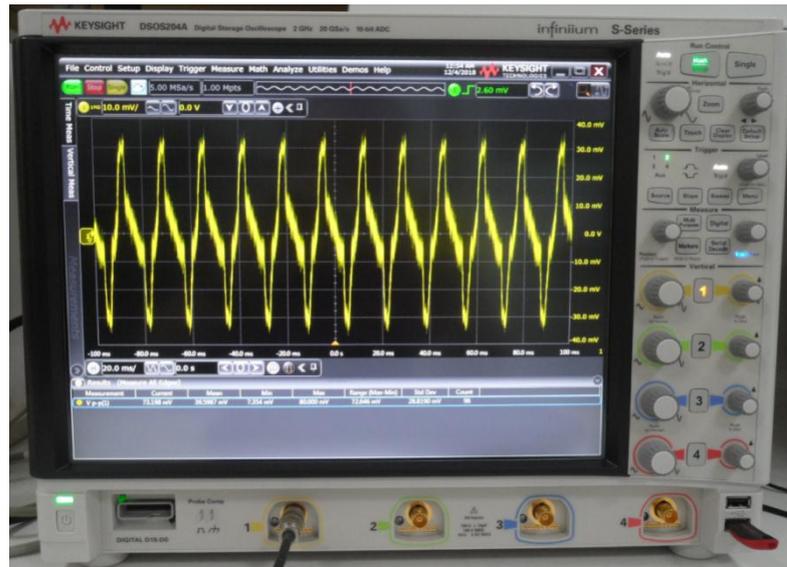


Fig. 6.4– Tela do osciloscópio recebendo sinais através de uma antena dipolo.

Como pode ser visto, o osciloscópio apresenta uma somatória dos sinais presentes no ambiente. Para minimizar ou de certa forma eliminar este problema, foi utilizada uma técnica desenvolvida durante a elaboração deste trabalho. Esta técnica consiste na simples colocação de um elemento resistivo em paralelo com a antena como mostra a Fig. 6.5.



Fig. 6.5 – Antena dipolo com a resistência instalada.

Para frequências baixas, a antena dipolo apresenta uma impedância muito elevada tendendo para infinito, isso não impede, porém que a mesma receba sinais que são medidos e apresentados na tela do osciloscópio como mostrado na fig. 6.4. Com uma resistência em paralelo o sinal recebido pelo osciloscópio é resultado da transferência de energia do dipolo para a resistência, o esquema desta ligação é ilustrado na fig. 6.6.

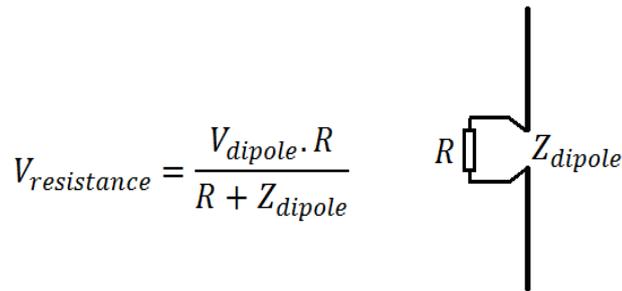


Fig. 6.6 – Resistência apresentada pelo conjunto antena/resistor.

Em frequências baixas, dado a alta impedância do dipolo esta tensão é muito próxima de zero, ou seja, não serão recebidos sinais. Na frequência de interesse a impedância de um dipolo de meia onda é próxima de  $50\Omega$ . Se o valor da resistência utilizada for de  $470\Omega$ , nesta frequência tem-se:

$$V_{out} = V_{signal} \cdot \frac{470}{470 + 50}$$

$$V_{out} = V_{signal} \cdot 0,904$$

Ou seja, aproximadamente 90% do sinal desejado estará presente na entrada do osciloscópio. Cabe realçar que o cabo coaxial utilizado bem como a impedância de entrada do osciloscópio é de  $50\Omega$ , assim sendo, a máxima transferência de potência ocorrerá para sinais próximos da frequência de ressonância do dipolo. Com a utilização do resistor a impedância do conjunto antena/resistor pode ser calculada como:

$$Z_{total} = \frac{50 \cdot 470}{50 + 470}$$

$$Z_{total} = 45,19\Omega$$

O resultado da eliminação das interferências com este procedimento (utilização do resistor) pode ser visto na Fig. 6.7. Esta técnica resultou em um trabalho publicado em Miami na Flórida na *International Applied Computational Electromagnetics Society (ACES) 2019* [57].



Fig. 6.7– Eliminação do ruído com a aplicação da técnica do resistor.

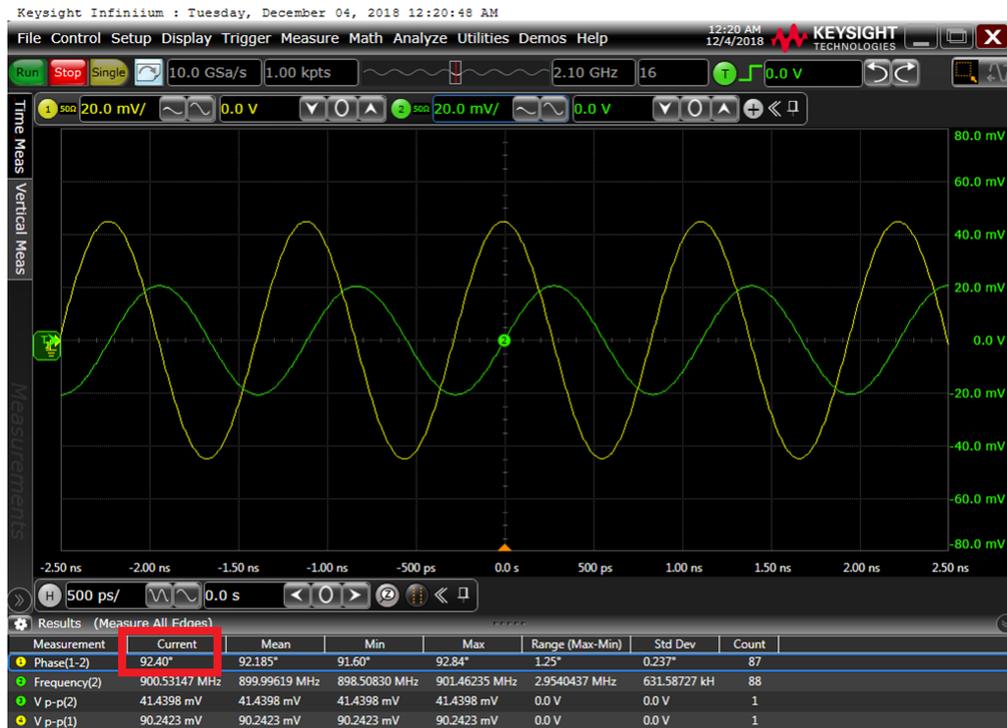
### 6.3 – Os resultados obtidos

Após eliminação dos sinais interferentes, um sinal em 900 MHz foi gerado por um gerador vetorial da marca Signal Hound modelo VSG25A e transmitido por um dipolo. Como receptor foi utilizado um osciloscópio de alta definição da marca Keysight modelo DSOS204A 2GHz 20GSa/s. Para  $d=\lambda/2$  na equação 13,  $\phi$  é igual a  $\pi\cos(\theta)$ . Os resultados deste experimento são mostrados na Tabela I.

TABELA I. DIFERENÇA DE FASE DAS CORRENTES RELACIONADA A POSIÇÃO DA ESTAÇÃO MÓVEL

Posição $\theta$	$\pi.\cos(\theta)$	Valor medido
30°	155.9°	157.8°
45°	127.3°	125.1°
60°	90°	92.4°
90°	0°	-2.4°
120°	-90°	-89.2°
135°	-127.3°	-129.4°
150°	-155°	-154.3°

Como esperado, o ângulo formado entre a posição da estação móvel e o plano formado pelos dipolos tem grande relação com a diferença de fase dos sinais nas antenas. O maior desvio ocorreu nas medidas dos ângulos de chegada de 90° e 0° apresentando ambos um desvio de 2,4°. Levando-se em consideração que o maior erro possível é de 180° este valor representa um erro de 1,34%. As Fig. 6.8 e Fig. 6.9 mostram a tela do osciloscópio em duas situações distintas: A primeira imagem com a estação móvel (transmissor) em um ângulo de 60° em relação ao plano formado pelas antenas receptoras e a segunda imagem com a estação móvel em um ângulo de 90°.



### Estação móvel à 60°

Fig. 6.8 – Tela do osciloscópio com os sinais das antenas 1 e 2 (móvel 60°).



### Estação móvel à 90°

Fig. 6.9 – Tela do osciloscópio com os sinais das antenas 1 e 2 (móvel 90°).

## 7 – O CIRCUITO ELETRÔNICO DIGITAL

### 7.1 – Introdução teórica

As técnicas de determinação da direção dos sinais apresentados neste trabalho, como demonstrado, podem ser aplicadas à telefonia móvel celular. Com o objetivo de apresentar um dispositivo de baixo custo aplicável à sistemas menos complexos como redes WIFI, sistemas de RFID, técnicas de localização por *Drones*, entre outros, um circuito com comparador de fase analógico e um conversor analógico para digital foi projetado. O diagrama em blocos da Fig. 7.1 mostra os principais componentes desse sistema.

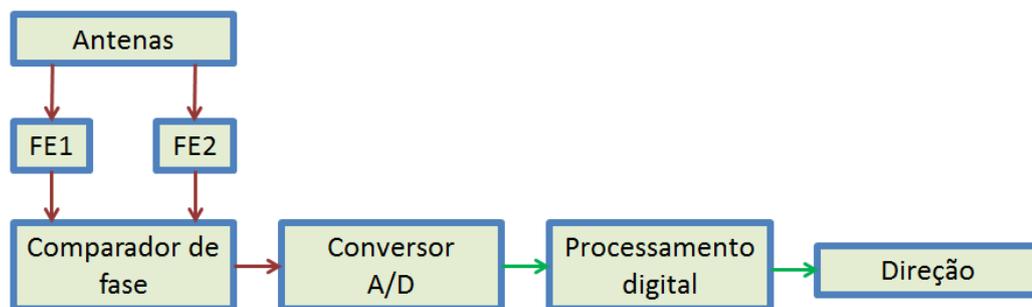


Fig. 7.1 – Diagrama em blocos do sistema proposto.

Neste diagrama os amplificadores de entrada FE (*Front-end*) foram projetados para operar na frequência de 900 MHz com um ganho de 30dB. Os sinais fornecidos por esses amplificadores são aplicados à um comparador de fase que fornece uma tensão de saída proporcional à diferença de fase dos sinais na entrada e uma tensão de saída proporcional à diferença entre as amplitudes dos sinais. Cabe salientar que, esse procedimento pode ser realizando de forma similar no sistema de telefonia 5G por software uma vez que o rádio digital é capaz de detectar a fase dos sinais. Estas duas tensões são aplicadas em conversores analógico-digital que fornecem os dados necessários ao software que faz o processamento da informação. No final desse processo o software de controle correlaciona a informação da diferença de fase entre as tensões nas antenas e a amplitude com o ângulo de chegada do sinal fornecendo uma informação visual e numérica em tempo real da direção da estação móvel.

## 7.2 – O amplificador de entrada

Para esse trabalho dois amplificadores de 30dB foram projetados e montados para funcionarem com amplificadores de sinais de entrada de baixo nível com baixo ruído conhecidos com *front-ends*. Estes amplificadores requerem um cuidado muito especial com o primeiro transistor amplificador [58], pois o ruído provocado por esse transistor é amplificado em cascata sendo o principal responsável pela relação sinal/ruído do amplificador. Para esse projeto foi utilizado um transistor Mosfet de dupla porta na entrada. Uma das portas é utilizada para polarização possibilitando a utilização da segunda porta como entrada de RF. Essa técnica resulta em uma alta sensibilidade com alta impedância de entrada. A Fig. 7.2 mostra o esquema do amplificador Mosfet de entrada com seu circuito de polarização e casadores de impedância na entrada.

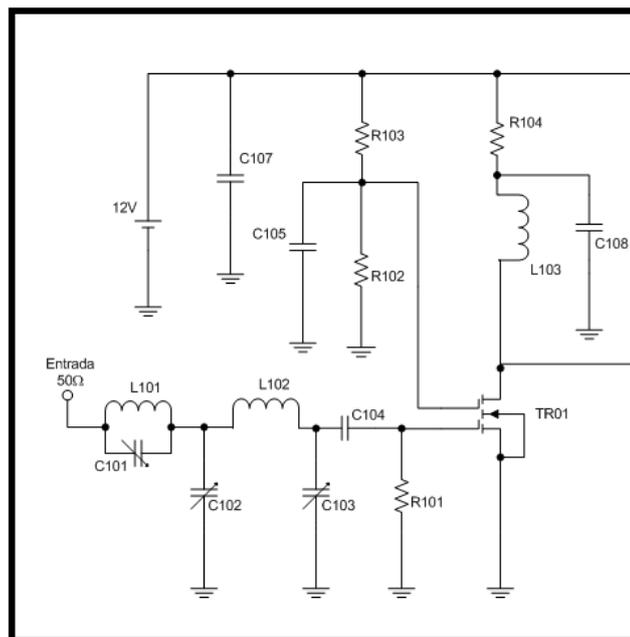


Fig. 7.2- Circuito de entrada do amplificador de baixo ruído.

Neste circuito o capacitor C101 e o indutor L101 foram utilizados como circuito *trap* para eliminar a amplificação de sinais inferiores e próximos à frequência de 900 MHz, sinais estes emitidos pelas torres de celular em operação na região dos testes. Os componentes C102, L102 e C103 fazem o casamento de impedância de entrada. O circuito de polarização é formado pelos resistores R102 e R103 sendo desacoplados pelo capacitor C105. O sinal de saída não sintonizado é retirado do dreno do transistor que recebe a alimentação através do

indutor L103. Este amplificador de entrada proporciona 10dB de ganho em 900 MHz com baixo ruído e alta sensibilidade. Para obtenção do ganho total de 30dB, mais dois transistores BJT são utilizados em cascata como mostra a Fig. 7.3.

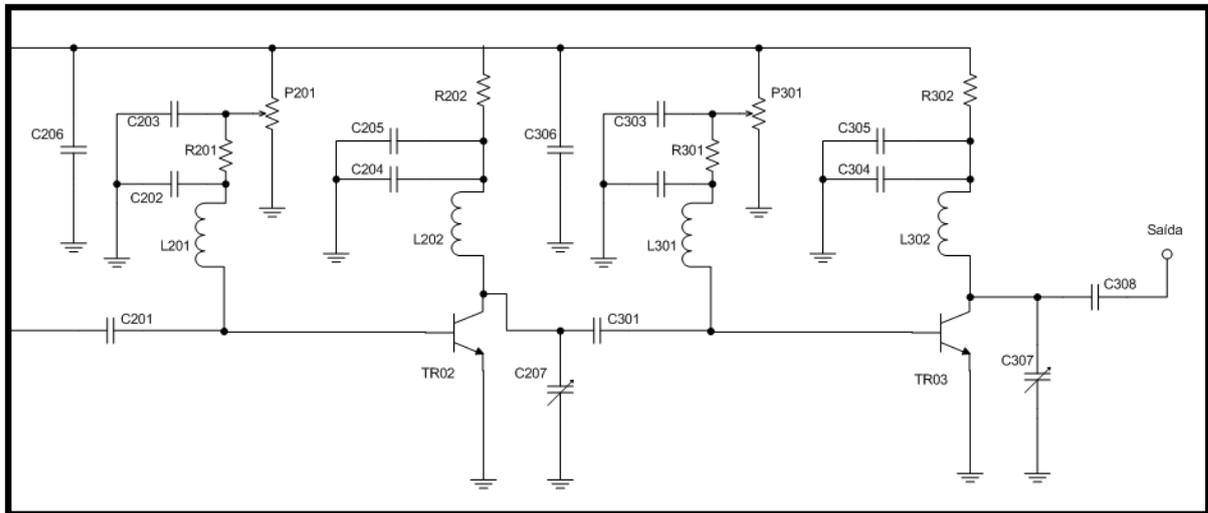


Fig. 7.3- Circuito amplificador de 20dB em cascata.

Neste circuito os *trimpots* P201 e P301 permitem o ajuste da polarização dos transistores que é feita através dos indutores L201 e L301. Os circuitos de saída destes dois amplificadores são sintonizados através das bobinas L202 e L302 e dos capacitores C207 e C307. A Fig. 7.4 mostra este conjunto de 30dB de ganho montado.

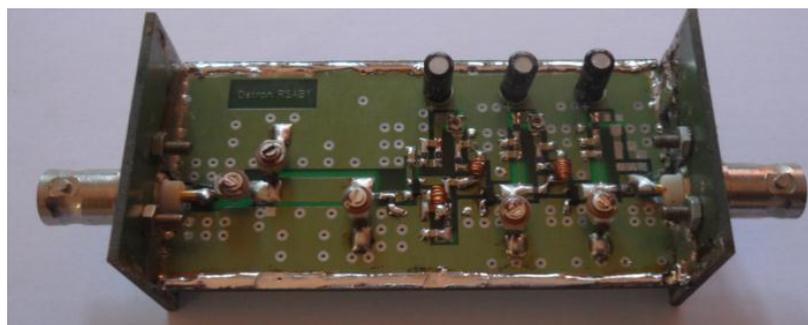


Fig. 7.4- Circuito amplificador de 30dB utilizado como amplificador de entrada.

### 7.3 – O circuito comparador de fase

O circuito comparador de fase utilizado tem como componente principal o circuito integrado AD8302 fabricado pela Analog Devices. Este circuito integrado fornece uma tensão

de saída proporcional à diferença de fase de dois sinais de entrada e uma tensão de saída proporcional à diferença entre as amplitudes dos sinais de entrada. Estes sinais devem estar entre -60dBm e 0dBm, justificando assim o desenvolvimento dos dois amplificadores de 30dB já descritos neste trabalho. A Fig. 7.5 mostra o comparador de fase utilizado neste trabalho.

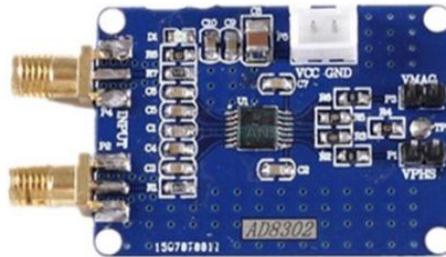


Fig. 7.5- Circuito comparador de fase AD8302 da Analog Devices.

#### 7.4 – O circuito conversor Analógico/Digital

Para conversão do sinal analógico para digital foi utilizado um microcontrolador ATMEL ATmega328p na plataforma Arduino Nano. Este microcontrolador possui 8 canais de conversão analógico para digital de 10 bits e na montagem Arduino trabalha com um conversor Serial-USB FTDI Chip FT232RL. Este conjunto pode ser programado e neste trabalho tem a função de converter os sinais analógicos para digital enviando esta informação em tempo real para o computador via porta USB, neste mesmo módulo um display LCD 16x2 é utilizado para mostrar em tempo real os dados da conversão. A Fig. 7.6 mostra o conversor analógico digital utilizado.

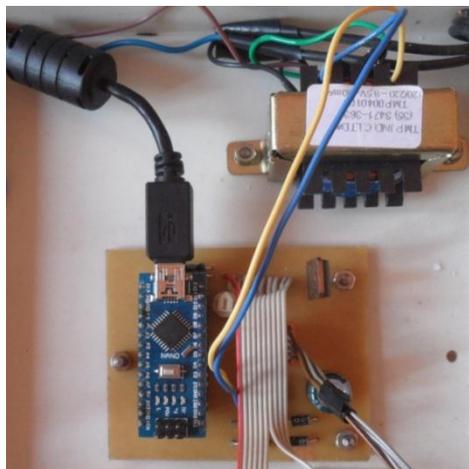


Fig. 7.6- Circuito utilizado na conversão analógico digital com conexão USB.

## 7.5 – O software de conversão

O software de conversão tem como função receber o resultado da conversão analógico para digital da diferença de fase e da diferença de amplitude pela porta USB, calcular o ângulo de chegada e apresentar em tempo real e de forma gráfica os resultados do processamento e a direção determinada pelas medidas.

Por se tratar de um ambiente de programação aberto e consolidado, o desenvolvimento do software foi feito em linguagem JAVA utilizando o ambiente de desenvolvimento Eclipse. A tela principal do programa desenvolvido é mostrada na Fig. 7.7.

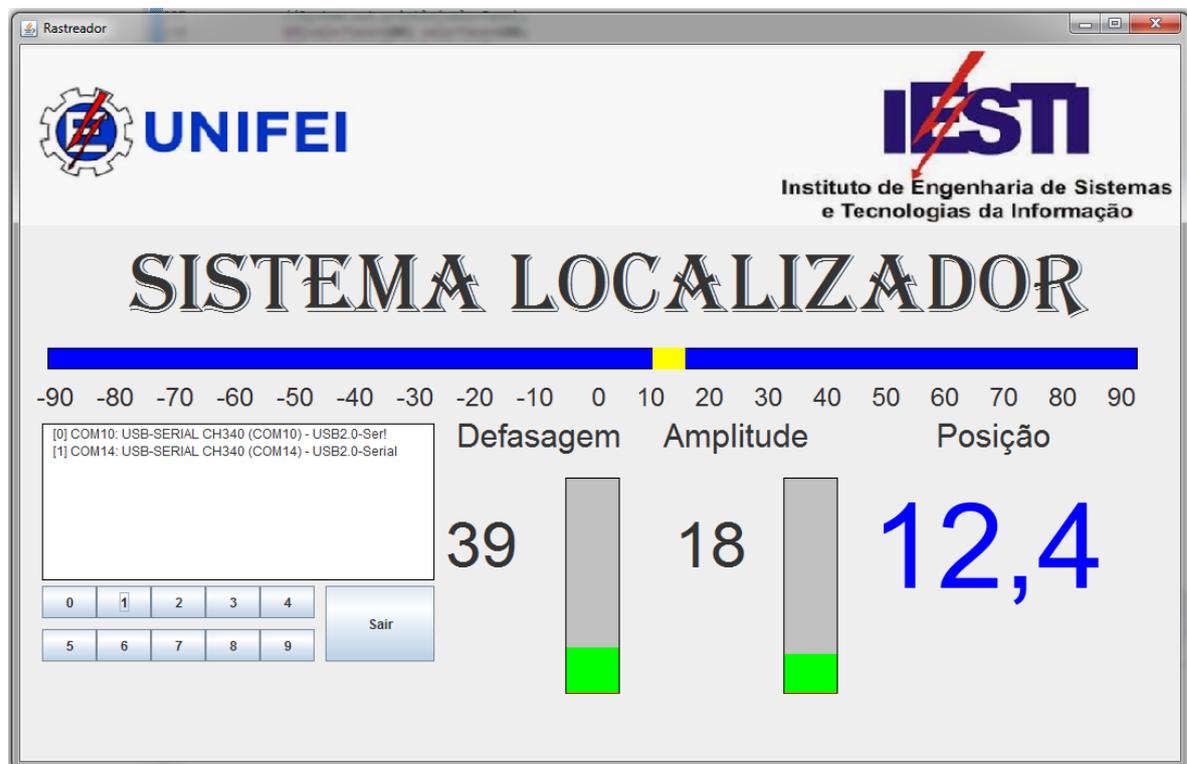


Fig. 7.7- Tela do programa desenvolvido para determinação do ângulo de chegada do sinal.

Na Fig. 7.7, a defasagem de fase e a diferença de amplitude são mostradas numericamente e através das barras verticais em tempo real. O ângulo de chegada é apresentado numericamente (Posição) e em uma barra horizontal. O diagrama do fluxo de dados deste software é ilustrado na Fig. 7.8.

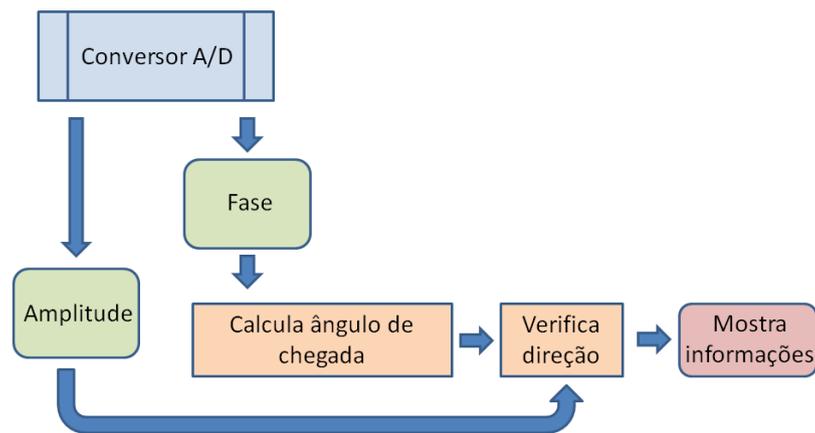


Fig. 7.8- Diagrama de fluxo de dados do programa desenvolvido.

Como ilustrado no diagrama de fluxo de dados da fig. 7.8, os sinais de fase e de amplitude são analisados. A Fig. 7.9 mostra a informação dada pela Analog Devices como resposta aos sinais na entrada do circuito integrado AD8302 sendo possível observar que para um único valor de tensão de saída existem dois ângulos relacionados.

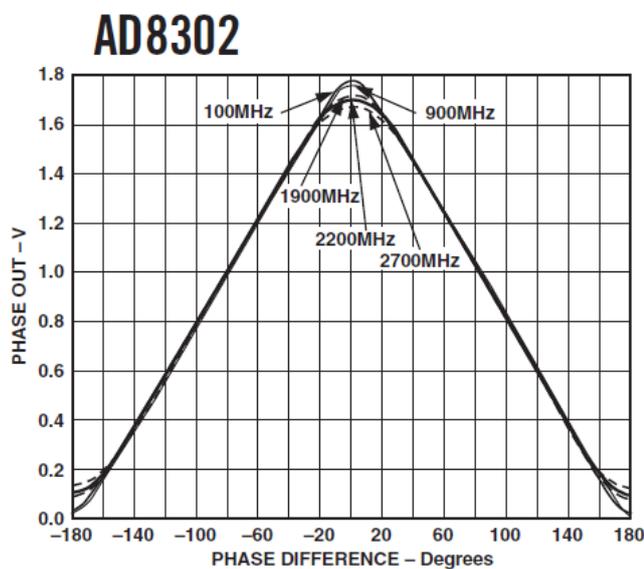


Fig. 7.9- Tensão de saída do circuito integrado AD8302 em função do ângulo de chegada.

Após calcular o ângulo de chegada, o software utiliza o valor da amplitude para definir se o ângulo calculado é positivo ou negativo. Isto é possível baseado no fato que, a antena mais próxima da fonte recebe um sinal com intensidade maior que a antena mais distante.

O sistema completo utilizado está ilustrado nas figuras 7.10 e 7.11 abaixo.



Fig. 7.10- Sistema em funcionamento no laboratório.



Fig. 7.11- Vista frontal do conjunto montado.

Os conceitos utilizados para determinação da direção do sinal neste circuito são os mesmos a serem utilizados na telefonia móvel 5G caso a técnica de determinação do AoA (Angle of Arrival) seja adotada.

## 7.6 – Resultados obtidos

Com o objetivo de avaliação em uma situação real, os testes deste circuito foram realizados no interior de uma residência. Os valores de ângulo e amplitude indicados no display do equipamento são valores de referência das conversões analógico para digital enviados ao computador pela porta de comunicação USB. No computador os valores obtidos da conversão analógico-digital são convertidos em ângulos de fase e estes transformados em valores de ângulo de chegada do sinal como demonstrado no item 6.1 deste trabalho. A figura 7.12 ilustra as conversões realizadas por esse circuito.

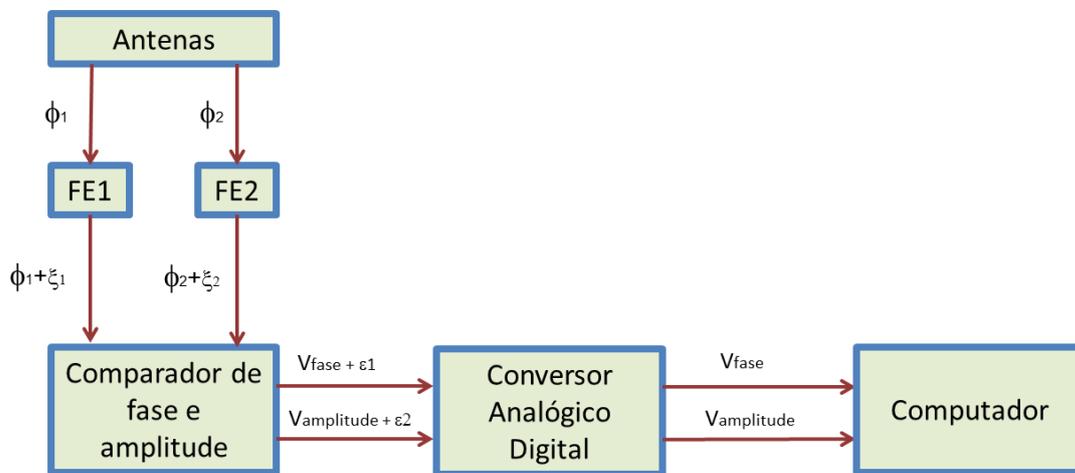


Fig. 7.12 – Erros relacionados ao processo de conversão.

Os valores  $\phi_1$  e  $\phi_2$  representam as fases das correntes nas antenas como observadas nas figuras 6.9 e 6.10. Depois de amplificados pelos circuitos FE1 e FE2 as fases e amplitudes desses sinais apresentam os erros  $\xi_1$  e  $\xi_2$  associados às diferenças e não linearidade dos amplificadores. A conversão da diferença de fase bem como a conversão da diferença de amplitudes realizada pelo circuito comparador de fase e amplitude também introduz um erro  $\epsilon_1$  e  $\epsilon_2$  dado à não linearidade deste conversor principalmente entre os valores de  $-20^\circ$  e  $20^\circ$  como pode ser observado na figura 7.9. São esperados erros menores nas conversões analógico para digital, assim sendo não foram considerados neste trabalho. A tabela II apresenta os resultados das medições dos ângulos desconsiderando a medição da diferença entre as amplitudes.

TABELA II. POSIÇÃO DA ESTAÇÃO MÓVEL E VALORES APRESENTADOS PELO PROGRAMA

<b>Posição <math>\Theta</math></b>	<b>Valor apresentado</b>
-75°	-70°
-60°	-50°
-45°	-35°
-30°	-22°
0°	0°
30°	26°
45°	40°
60°	53°
75°	80°

Durante os ensaios, os valores da tabela II apresentaram variações de até 10° a medida que o cenário se modificava com a movimentação de pessoas e posicionamento dos objetos. Como o circuito integrado AD8302 apresenta a mesma tensão para ângulos positivos e negativos, a determinação do sinal é realizada através da amplitude dos sinais. O conversor AD8302, apesar de garantir a viabilidade do projeto como prova de conceito, esse conversor específico não apresentou uma boa resposta nos testes realizados, sendo este um ponto a ser melhorado caso esse venha a ser utilizado em um produto comercial. Baseado nos valores obtidos e apresentados na Tabela II é possível concluir que, a técnica de localização ou determinação da direção da estação móvel utilizando circuitos de baixo custo é viável e pode ser utilizada em sistemas de comunicação como WIFI, RFID, controle de *Drones* entre outros.

## 8 – CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho apresentou um sistema digital de conversão de ângulo de chegada que auxilia o gerenciamento de unidades móveis para a futura rede de quinta geração 5G. Neste novo modelo a MME, parte integrante dos atuais sistemas de telefonia móvel e responsável pelo gerenciamento das estações, utiliza a técnica do ângulo de chegada do sinal para determinar quais estações base deverão enviar mensagens de sinalização (*paging*) com o objetivo de localizar a estação móvel dentro da área de cobertura. No sistema atual, as regiões são divididas nas chamadas *Tracking Area* compostas de várias estações bases gerenciadas pela MME. Quando uma estação móvel dentro de uma área de cobertura de uma estação base se movimenta em direção à outra estação base, a MME envia uma solicitação para todas as estações da vizinhança da estação atual para determinar o local da estação móvel. Como essa solicitação utiliza o *backhaul* (ponto da rede próxima do usuário), a capacidade de utilização da rede por parte das estações móveis é reduzida. Com a utilização do sistema de determinação de direção proposto por este trabalho a MME terá parâmetros que permitem decidir quais estações deverão enviar o sinal de *paging* não ativando todas as estações da vizinhança reduzindo assim o uso do *backhaul* e a quantidade de sinal irradiado pelas estações.

É importante destacar que utilizar um sistema de determinação de direção do aparelho móvel como técnica auxiliar no gerenciamento de rede é algo inovador, e é principal contribuição deste trabalho de doutorado.

A técnica de determinação do ângulo de chegada proposta neste trabalho apresentou resultados muito próximos dos resultados teóricos desenvolvidos. O maior erro observado foi de  $2,4^\circ$  nas medições com osciloscópio que representa um erro de 1,34%. No mesmo ensaio, para um ângulo de chegada de  $150^\circ$  a diferença entre as fases medidas foi de  $-154,3^\circ$  sendo esperado um ângulo de  $-155^\circ$ , um erro de  $0,7^\circ$ . O circuito eletrônico digital desenvolvido apresentou os mesmos resultados, porém com uma margem de erro maior. Sendo inicialmente ajustado para determinar a estação móvel em um ângulo perpendicular ao plano formado pelas antenas (considerado  $0^\circ$ ), esse apresentou em erro de  $10^\circ$  na determinação do ângulo de chegada do sinal à  $60^\circ$ , um erro de 9% desse circuito. É importante observar que, o efeito de multipercurso altera significativamente os resultados no interior de residências assim sendo é possível afirmar que os objetivos do experimento foram atingidos.

Propõe-se os seguintes trabalhos futuros:

- Desenvolvimento de um software de controle que de forma otimizada utilize as técnicas apresentadas neste trabalho.
- Como a técnica de determinação da direção do sinal permite um direcionamento do feixe na direção da estação móvel um estudo da aplicação dessa técnica em outras tecnologias também é proposto, como exemplo o estudo da aplicação desta técnica em *Drones*, redes WIFI, RFID entre outros.
- Propõe-se, também, um estudo visando a otimização do circuito eletrônico desenvolvido com o objetivo de redução do custo e da não dependência da amplitude para a determinação do ângulo de chegada.
- Como resultado do possível direcionamento e concentração do sinal em uma determinada direção, é proposto um estudo da redução do consumo da bateria e uma redução da taxa de absorção específica pelo corpo humano.

## LISTA DE REFERÊNCIAS

- [1] G. J. Mullet, *Wireless Telecommunication Systems and Networks*, Springfield, MA: Ed. Thomson, 2006.
- [2] F. Hillebrand, “The Creation of Standards for Global Mobile Communication: GSM and UMTS Standardization from 1982 to 2000”, *IEEE Wireless Communication*, vol. 20, no. 5, pp 24-33, Outubro de 2013.
- [3] A. E. Mahjoubi, N Hmina, “M2M and eMTC communications via NB-IoT, Morocco first Testbed Experimental Results and RF Deployment Scenario: new approach to improve main 5G KPIs and performances”, International Conference on Wireless Networks and Mobile Communications (WINCOM), Rabat, Marrocos, 2017.
- [4] L. Zhang, A. Ijaz, P. Xiao, R. Tafazolli, “Multi-Service System: An Enabler of Flexible 5G Air Interface”, *IEEE Communications Magazine*, outubro de 2017.
- [5] Qualcomm, “Understanding 3GPP – Starting with the basics”, *Qualcomm*, [Online]. Disponível em: <https://www.qualcomm.com> [Acessado em 03 de fevereiro de 2019].
- [6] 3GPP, “About 3GPP”, *3GPP*. [Online]. Disponível em: <http://www.3gpp.org/about-3gpp> [Acessado em 15 de janeiro de 2019].
- [7] 3GPP, “Overview of 3GPP Release 9 V0.3.4”, *3GPP*. [Online]. Disponível em: <https://www.3gpp.org> [Acessado em 02 de fevereiro de 2019].
- [8] H. A. Dorai e L. A. A. Irkhis, “No Inter-Network Tracking Area Update Scenario Toward 5G Network”, 8th Annual Ubiquitous Computing, Electronics and Mobile Communication Conference (UEMCON), New York, NY, USA, 2017.
- [9] X. Ge, S. Tu, G. Mao, C. Wang e T. Han, “5G Ultra-Dense Cellular Networks”, *IEEE Wireless Communication*, vol. 23, no. 1, pp 72-79, Outubro 2016.,
- [10] 3GPP, “Overview of 3GPP Release 8 V0.3.3”, *3GPP*. [Online]. Disponível em: <https://www.3gpp.org> [Acessado em 02 de fevereiro de 2019].
- [11] R. Cheng, “5G is real and lightning fast (sometimes): Here's everything you need to know”, *CNET*, [Online]. Disponível em: <https://www.cnet.com> [Acessado em 23 de Junho de 2019].
- [12] The National Archive, “First World War telecommunications”, *The National Archive*. [Online]. Disponível em <http://www.nationalarchives.gov.uk> [Acessado em 04 de janeiro de 2019].
- [13] H. S. Magnuski, “A War Department Technical Manual TM 11-242”, *Radio Set SCR-*

300.[Online]. Disponível em <http://www.scr300.org> [Acessado em 04 de janeiro de 2019].

- [14] T. N. Rodovalho, A. C. S. Junior, “Evolução da Telefonia Móvel: 1G ao 4G”, *I Seminário de Redes e Sistemas de Telecomunicações*, Inatel Santa Rita do Sapucaí, MG, Setembro de 2014.
- [15] D. A. Guimarães, “Sistemas de Comunicação Móvel de Terceira Geração”. *Revista Científica Periódica de Telecomunicações – INATEL*, vol. 4, no. 1, maio de 2001.
- [16] A. Pocovnicu, “Biometric Security for CellPhones”, *Informatica Economica*, vol. 13, no. 1, 2009.
- [17] Tutoriais Telefonia Celular, “Banda para Telefonia Celular: 850 MHz e o sistema AMPS”, *Teleco Inteligência em Telecomunicações*. [Online]. Disponível em <http://www.teleco.com.br> [Acessado em 03 de janeiro de 2019].
- [18] P. Karn, “The Qualcomm CDMA digital cellular system”, *ResearchGate*, San Diego, CA, janeiro de 1993.
- [19] Electronics Notes, “What is GPRS”, *Electronics Notes*. [Online]. Disponível em: <https://www.electronics-notes.com> [Acessado em 03 de fevereiro de 2019].
- [20] M. Bagaa, T. Taleb e A. Ksentini, “Efficient Tracking Area Management in Carrier Cloud”, *IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, San Diego, CA, USA, 2015.
- [21] D. Zhu, J. Choi, Q. Cheng, W. Xiao e R. W. Heath Jr., “High-Resolution Angle Tracking for Mobile Wideband Millimeter-Wave Systems With Antenna Array Calibration”, *IEEE Transactions on Wireless Communication*, vol. 17, no. 11, pp 7173-7189, Novembro de 2018.
- [22] V. Ratnam, A. F. Molish, O. Y. Bursalioglu e H. C. Papadopoulos, “Hybrid Beamforming With Selection for Multiuser Massive MIMO Systems”, *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 66, no. 15, pp 4105-4120, Agosto de 2018.
- [23] B. Yang, Z. Yu, J. Lan, R. Zhang, J. Zhou e W. Hong, “Digital Beamforming-Based Massive MIMO Transceiver for 5G Millimeter-Wave Communications”, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 66, no. 7, pp 3403-3418, Julho de 2018.
- [24] H. M. Aung, W. Z. Hein, H. M. Tun, “Performance Evaluation of GSM Transmission over Different Modulation Schemes (BPSK, QPSK, GMSK)”, *International Journal of Scientific and Research Publications*, vol. 4, no. 4, abril de 2014.

- [25] N. Youssef, A. Ghazel, S. Tabbane, M. Zhilli, “Software Development for DSP Implementation of GMSK Modulation for GSM Transceiver”, 5th Africon Conference in Africa, Cidade do Cabo, Africa do Sul, 1999.
- [26] 3GPP, “Summary of all Release 99 Features”, *3GPP*. [Online]. Disponível em: <https://www.3gpp.org> [Acessado em 02 de fevereiro de 2019].
- [27] 3GPP, “Overview of 3GPP Release 1999 V0.1.1”, *3GPP*. [Online]. Disponível em: <https://www.3gpp.org> [Acessado em 02 de fevereiro de 2019].
- [28] 3GPP, “Summary of all Release 4 Features”, *3GPP*. [Online]. Disponível em: <https://www.3gpp.org> [Acessado em 02 de fevereiro de 2019].
- [29] 3GPP, “Summary of all Release 5 Features”, *3GPP*. [Online]. Disponível em: <https://www.3gpp.org> [Acessado em 02 de fevereiro de 2019].
- [30] 3GPP, “Summary of all Release 6 Features”, *3GPP*. [Online]. Disponível em: <https://www.3gpp.org> [Acessado em 02 de fevereiro de 2019].
- [31] ETSI, “2<sup>nd</sup> Generation (GERAN)”, *ETSI*. [Online]. Disponível em: <https://www.etsi.org> [Acessado em 29 de janeiro de 2019].
- [32] 3GPP, “Summary of all Release 7 Features”, *3GPP*. [Online]. Disponível em: <https://www.3gpp.org> [Acessado em 02 de fevereiro de 2019].
- [33] 3GPP, “Overview of 3GPP Release 10 V0.2.1”, *3GPP*. [Online]. Disponível em: <https://www.3gpp.org> [Acessado em 02 de fevereiro de 2019].
- [34] 3GPP, “Overview of 3GPP Release 11 V0.2.0”, *3GPP*. [Online]. Disponível em: <https://www.3gpp.org> [Acessado em 02 de fevereiro de 2019].
- [35] 3GPP, “Overview of 3GPP Release 12 V0.2.0”, *3GPP*. [Online]. Disponível em: <https://www.3gpp.org> [Acessado em 02 de fevereiro de 2019].
- [36] 3GPP, “Release 13 analytical view version Sept. 9th 2015”, [Online]. Disponível em: <https://www.3gpp.org> [Acessado em 02 de fevereiro de 2019].
- [37] 5G Americas, “Understanding the Standards for LTE-Advanced Enhancements”, *5G Americas*. [Online]. Disponível em: <https://www.5gamericas.org> [Acessado em 22 de fevereiro de 2016].
- [38] 3GPP, “Overview of 3GPP Release 14 V0.0.1”, [Online]. Disponível em: <https://www.3gpp.org> [Acessado em 02 de fevereiro de 2019].
- [39] S Anthony, “5G specs announced: 20Gbps download, 1ms latency, 1M devices per square km”, *arsTechnica*. [Online]. Disponível em: <https://arstechnica.com> [Acessado em 23 de fevereiro de 2019].

- [40] P. Gilski, J. Stefanski, “Survey of Radio Navigation System”, *International Journal of Electronics and Telecommunications*, vol. 61, no. 1, pp. 43–48, 2015.
- [41] L. M. Antas, *Glossário de termos técnicos*, Coleção Aeroespacial, São Paulo, 1979.
- [42] B. O. Keefe, “Finding Location with Time of Arrival and Time Difference of Arrival Techniques”, ECE Senior Capstone Project, Tech Notes, 2017.
- [43] C. G. Moura, “Predição de campo em Comunicação sem fio”, *Dissertação de Mestrado UFRN*, dezembro de 2011.
- [44] A. Ghasemi, A. Abedi e F. Ghasemi, *Propagation Engineering in Wireless Communication*, Second Edition, Ed. Springer, 2016.
- [45] Recommendations of the CCIR, International Radio Consultive Committee, Propagation in Non-Ionized Media, Genova, 1990.
- [46] J. N. Carvalho, “Propagação em áreas urbanas na faixa de UHF Aplicação ao planejamento de sistemas de TV digital”, *Dissertação de Mestrado PUC-Rio*, agosto de 2003.
- [47] J. D. Kraus and K. R. Carver, *Electromagnetics*, Tokio: McGraw-Hill, 1973.
- [48] J.A.J. Ribeiro, *Propagação de Ondas Eletromagnéticas*, São Paulo: Ed. Érica, 2004.
- [49] GPS.gov, “How GPS works”, *GPS.gov*. [Online]. Disponível em: <https://www.gps.gov> [Acessado em 25 de fevereiro de 2019].
- [50] Australian Bureau of Meteorology, “How Radar Works”, *Australian Bureau of Meteorology*. [Online]. Disponível em: <http://www.bom.gov.au> [Acessado em 28 de fevereiro de 2019].
- [51] 3GLTEinfo, “LTE Handover Overview”, *3GLTEinfo*. [Online]. Disponível em: <http://www.3glteinfo.com> [Acessado em 03 de março de 2019].
- [52] 3GPP, “3GPP TS 23.401”, [Online]. Disponível em: <https://www.3gpp.org> [Acessado em 04 de março de 2019].
- [53] R. Bansal, *Fundamentals of Engineering Electromagnetics*, Boca Raton: Taylor & Francis Group, 2006.
- [54] S. Aditya, A. F. Molisch, H. M. Behairy, “A survey on the Impact of Multipath on Wideband Time-of-Arrival-Based Localization”, *Proceedings of the IEEE*, vol. 106, no. 7, pp. 1183-1203, 2018.
- [55] S. Wielandt, L. D. Strycker, “Indoor Multipath Assisted Angle of Arrival Localization”, *Sensors*, vol. 17, no. 11, Novembro de 2017.
- [56] ARRL, *Antenna Book*, American Radio Relay League, Newington, CT, USA, 1997.

[57] D. R. M. Faria, K. M. Santos, R. A. Santos, D. H. Spadoti, "A Simple Methodology to Eliminate Noise in the Antennas Dipoles Measurements", presented at International Applied Computational Electromagnetics Society (ACES), Miami, FL, USA, 2019.

[58] L. Besser, R. Gilmore, Practical RF Circuit Design for Modern Wireless System, Norwood, MA, USA: Artech House Inc., 2002.