

Unb – Universidade de Brasília
Departamento de Engenharia Elétrica

MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL:

ESTUDO SOBRE A TECNOLOGIA SDR E UMA PROPOSTA
INICIAL PARA O FRONT-END DE RF

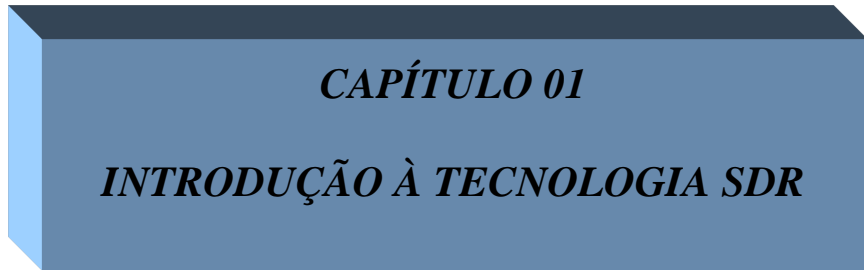
Professor Orientador: Leonardo R. A. X Menezes.
Aluna: Olga Regina da Silva Sant'Anna.
Matrícula: 96/05100.

Brasília, 29 de Abril de 2002.

RESUMO

O SDR (*Software Defined Radio*) é uma tecnologia que surge como uma solução possível para a demanda, principalmente pela área de telefonia celular em sua evolução de sistemas 2G para 3G, por sistemas flexíveis e de banda larga. A discussão acerca do SDR e de sua concepção é muito recente, não havendo muita divulgação sobre o desenvolvimento desta tecnologia no Brasil. Portanto, um dos principais objetivos deste projeto é reunir algumas das informações existentes em uma única referência bem como analisar certos aspectos desta tecnologia a partir do estudo destas publicações.

Este projeto também tem como objetivo mostrar as aplicações da tecnologia SDR bem como seu nível de desenvolvimento e as barreiras tecnológicas existentes para sua completa aplicação nos dias de hoje. Como a tecnologia *Software Defined Radio* é interdisciplinar, envolvendo em sua concepção conhecimentos profundos em RF (Rádio Frequência), processamento digital de sinais e desenvolvimento de softwares, o estudo acerca desta tecnologia foi dividido nestas três partes complementares. Neste projeto é proposta uma arquitetura de RF inicial para o *front-end* SDR.



CAPÍTULO 01
INTRODUÇÃO À TECNOLOGIA SDR

1.1- INTRODUÇÃO À TECNOLOGIA SDR

Os avanços nas tecnologias de semicondutores produziram um aumento de capacidade de processamento e memórias endereçáveis em *chips* cada vez menores [12]. Estes avanços, combinados com uma explosão de demanda por novas aplicações e serviços *wireless*, resultaram no crescimento explosivo das tecnologias de rádio digital. Rádios com suas funções controladas via software e com alta velocidade de processamento digital de sinais são definidos como rádios “inteligentes” e estão relacionados com a evolução progressiva da tecnologia. Neste cenário, o SDR (*Software Defined Radio*) é caracterizado como um dispositivo no qual a maior parte do processamento é realizado no domínio digital, utilizando DSPs (*Digital Signal Processors*) programáveis em sua plataforma de hardware, com algum processamento realizado no domínio analógico, como circuitos de RF e IF (Frequência intermediária). O SDR representa a implementação da funcionalidade do rádio em um software.

No SDR ideal, a antena seria conectada diretamente ao conversor analógico- digital e o processamento do sinal seria todo feito digitalmente, utilizando-se DSPs totalmente programáveis e de alta velocidade. Desta maneira, as aplicações e funções do rádio poderiam ser adicionadas, configuradas e atualizadas via software. Com o aumento da velocidade de processamento, não haverá necessidade, no futuro, de se realizar a conversão de frequência para banda base e a digitalização será realizada nas frequências do sinal de entrada, expandindo a área de atuação das funções de rádio controladas por software.

Desta maneira, o SDR oferece uma solução para os sistemas sem fio, nos quais ele é neutro à variedade de padrões e especificações dos sistemas em uso ou em desenvolvimento. O conceito de *Software Defined Radio* pode ser visto como análogo a um computador pessoal, sendo capaz de aceitar atualizações de algoritmos de controle através do ar ou da rede assim como novas aplicações podem ser “baixadas” da internet nos computadores pessoais. Assim como para o computador, uma harmonização global tende a acontecer nas arquiteturas de software, haja vista que estas irão controlar como o dispositivo irá interagir com o meio – o espectro de frequência.

1.1.1- HISTÓRICO DA EVOLUÇÃO DO CONCEITO SDR:

Dos anos de 1970 para os de 1980 assistiu-se à migração dos sistemas de rádio analógico para sistemas de rádio digital. A partir de 1980, uma explosão de sistemas móveis celulares tem produzido, em todo o mundo, a definição de muitos padrões analógicos e digitais. Nos anos 90, houve a concepção do chamado *Software Defined Radio*, que realizará as funções de rádio em plataformas digitais programáveis e reconfiguráveis, através da definição destas funções por um software [11].

Atualmente, o *Software Defined Radio* depende do desenvolvimento de dispositivos totalmente reconfiguráveis para chegar ao grau de flexibilidade idealizado. Com o desenvolvimento de conversores analógico-digitais de banda larga será possível acessar frequências da ordem de GHz, caracterizando o conceito ideal do *Software Defined Radio*, o tratamento totalmente digital do sinal realizado por FPGAs (*Field Programmable Gate Arrays*) totalmente reprogramáveis.

Como dito anteriormente, a partir de 1980 começaram a surgir diversos padrões de comunicações móveis no mundo todo. Muitos destes padrões não são interoperáveis, tornando impossível um *roaming* global. Em 2000, a competição industrial entre Ásia, Europa e América prometeu dificultar ainda mais a definição de um padrão único para os sistemas móveis do futuro [11]. Neste ambiente, o conceito de rádio via software vem como uma solução prática: Uma implementação via software do terminal do usuário, que será capaz de adaptar-se dinamicamente ao ambiente de rádio em que está inserido. O termo rádio via software quer dizer que as funcionalidades do rádio serão definidas por software. A presença de um software definindo a interface de rádio implica o uso de DSPs, ao invés de se utilizar os hardwares dedicados, para executar o software em tempo real. Portanto, a maior razão para se desenvolver uma estrutura parametrizada definida via software e executada por DSPs e FPGAs é conferir alta flexibilidade ao sistema permitindo, entre outros benefícios, um *handover* intersistemas, ou como dito anteriormente, um *roaming* global.

1.1.2- DIFERENÇAS ENTRE RÁDIO DIGITAL E SDR:

Para se desenvolver um conceito para a tecnologia SDR é necessário se fazer uma distinção entre esta e a tecnologia de rádio digital:

- Rádio Digital: Caracterizado pela conversão do sinal analógico para um sinal digital que será processado por um DSP. O processamento é feito de um modo previamente definido, não reconfigurável.
- *Software Defined Radio*: Idealmente caracterizado pela conversão analógico-digital da portadora de RF, diretamente da antena. O processamento do sinal é feito por uma implementação de rádio digital, no entanto, programável e reconfigurável dinamicamente.

Portanto, o SDR é reprogramável dinamicamente. Na realidade, ainda não existe uma definição exata deste conceito. Além da explicação acima existem algumas outras, encontradas freqüentemente na literatura [4]:

- Arquitetura de transmissão e recepção flexível, controlada e programada por um software;
- Equipamento de rádio reconfigurável dinamicamente, via um *download* de software;
- Realização via software de terminais multi-modo e multi-banda;
- Transceptor onde as seguintes funções podem ser realizadas via software: Banda de frequência e largura de canal; Modulação e codificação e aplicações do usuário;

Na realidade, todas as definições acima se completam na descrição do SDR. O rádio via software é uma tecnologia de rádio flexível , multi-banda, multi-modo, multi-serviços, reconfigurável e reprogramável via software. Sua flexibilidade consiste na capacidade de

operar em um ambiente multi- serviço, sem ser restrito a um padrão particular, mas capaz de oferecer, em teoria, serviços de todos os sistemas já padronizados, em qualquer banda de frequência. A compatibilidade de um sistema de radio via software com qualquer definição de radio é garantida pela sua capacidade de reconfiguração, que é conseguida através da reprogramabilidade dos DSP's, onde DSP não quer dizer somente o *chipset* DSP, mas todo o conceito de processamento digital de sinais, o que envolve também FPGA's , processadores GP (*General Purpose*) bem como a combinação destes.

Até o momento, a criação de um sistema de radio via software continua sendo utópica. De qualquer forma, esta tecnologia representa o objetivo a ser atingido.

O desenvolvimento de um sistema de radio via software implica o alcance de alguns objetivos [4]:

- Mover no transmissor e no receptor o limite entre digital e analógico o máximo possível em direção à faixa de RF, utilizando-se de conversão de banda larga A/D e D/A o mais próximo possível da antena. Deste modo, é permitido o total tratamento do sinal via software;
- Equilíbrio da demanda de processamento computacional com a capacidade de processamento do hardware;
- Tecnologias analógica, digital e de software utilizadas de forma complementar na formação do SDR;
- Substituição de ASIC's (hardware dedicado) por DSPs para processamento em banda base, para que se possa definir o máximo de funções via software;

Atualmente, o ASIC é a tecnologia prevalecente nos transmissores e receptores. No entanto, o uso de DSP já é uma realidade. De fato, alguns protótipos de estação radio base para GSM e UMTS utilizam DSP para processamento em banda base [11]. Nesses casos, porém, ainda não se pode falar em radio via software porque nem todas as funções são realizadas em DSP e são utilizados softwares limitados e carregados previamente, o que não caracteriza a flexibilidade e a reprogramabilidade dos rádios.

1.1.3- O SDR COMO CAMINHO PARA EVOLUÇÃO DE RÁDIO:

No mercado de comunicações móveis, como cada provedor de serviço ou fabricante requer o seu padrão, o objetivo do SDR é tornar possível a produção de *front-ends* e estações rádio base que possam ser temporariamente específicos em relação a um dado sistema ou padrão.

A principal motivação econômica para o desenvolvimento do SDR é a evolução dos sistemas de telefonia celular de 2G para 3G, já que os sistemas 3G requerem flexibilidade, interoperabilidade e banda larga. Quanto a este aspecto de mercado, 77% dos fabricantes consideram que o ritmo de desenvolvimento do SDR é compatível com os requerimentos do 3G [7].

O desenvolvimento de uma nova tecnologia, quando são analisados dados históricos, pode ser descrito por uma curva em forma de S que caracteriza o seu crescimento, quando escolhido algum parâmetro de análise como investimento ou velocidade de desenvolvimento, em função do tempo [7]. Como pode ser observado na curva S do desenvolvimento do SDR, inicialmente uma nova tecnologia experimenta um crescimento lento devido à sua baixa performance quando em comparação com as tecnologias já firmadas no mercado e com largo uso, como no caso de se comparar o desenvolvimento do SDR com a infra-estrutura de sistemas móveis de 2G. No entanto, quando as duas tecnologias atingem o mesmo nível de performance técnica, as possibilidades trazidas pela nova tecnologia atrai investimentos, fazendo com que o desenvolvimento desta cresça exponencialmente. Este crescimento fica lento quando se aproxima, assintoticamente, de alguma propriedade limitante. No caso da curva S do SDR, este decaimento no desenvolvimento da tecnologia se dará quando os sistemas 3G já estiverem em plena operação.

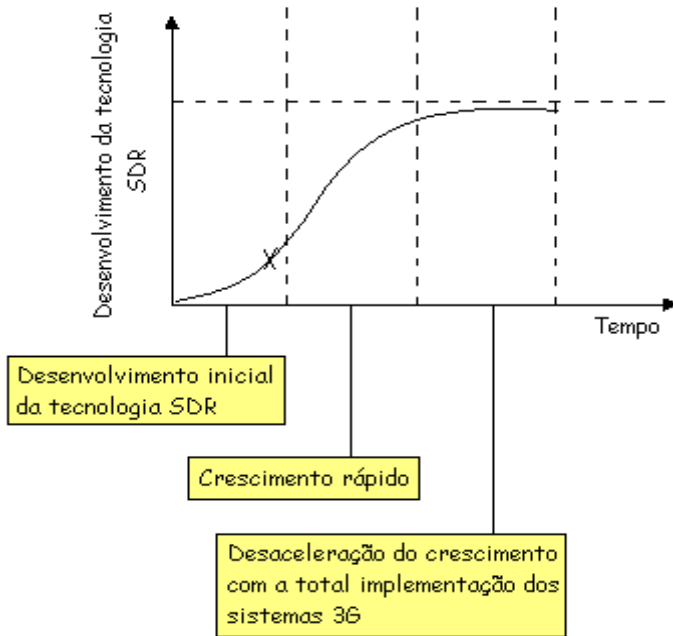


FIG.1- Curva de desenvolvimento da tecnologia SDR.

O SDR ideal representa o ponto máximo de flexibilidade de uma plataforma de rádio. As propriedades deste rádio representam o máximo que se pode alcançar e são usadas para medir o progresso das tecnologias em direção à generalização e à flexibilidade.

Com relação ao desenvolvimento da arquitetura do SDR, se observa que esta depende do desenvolvimento tecnológico de vários aspectos, como conversão analógico-digital de banda larga e com alta resolução, antenas de banda larga, FPGA's totalmente reconfiguráveis dinamicamente, entre outros. Nos anos 90, os hardwares de rádio móvel podiam ser caracterizados por uma plataforma com somente uma ou duas bandas isoladas de RF. Um ou dois canais (controle e tráfego) e capacidade de processamento digital em banda base. Em 2010, espera-se que as plataformas de rádio sejam definidas em termos de acesso a RF de banda larga, vários canais simultâneos suportados e processamento digital com largura de banda moderada em frequência intermediária [4]. Para se desenvolver a plataforma de rádio do SDR, pode-se propor uma plataforma de referência para o *front-end*, que poderá ser disposta em diagrama de blocos de modo que possa haver uma maior visualização dos componentes necessários, da capacidade requerida, dos parâmetros físicos, entre outros. Esta plataforma proposta na forma de diagrama de blocos, no entanto, não deve limitar o desenvolvimento da criatividade de forma a não se visualizar esta como

única possibilidade, mas como um guia para o desenvolvimento, no qual se associa os parâmetros críticos aos componentes físicos de forma a permitir que se delineie um caminho de evolução para a plataforma de hardware. Uma plataforma de referência, com alguns parâmetros críticos distribuídos pelos componentes, é mostrada abaixo:

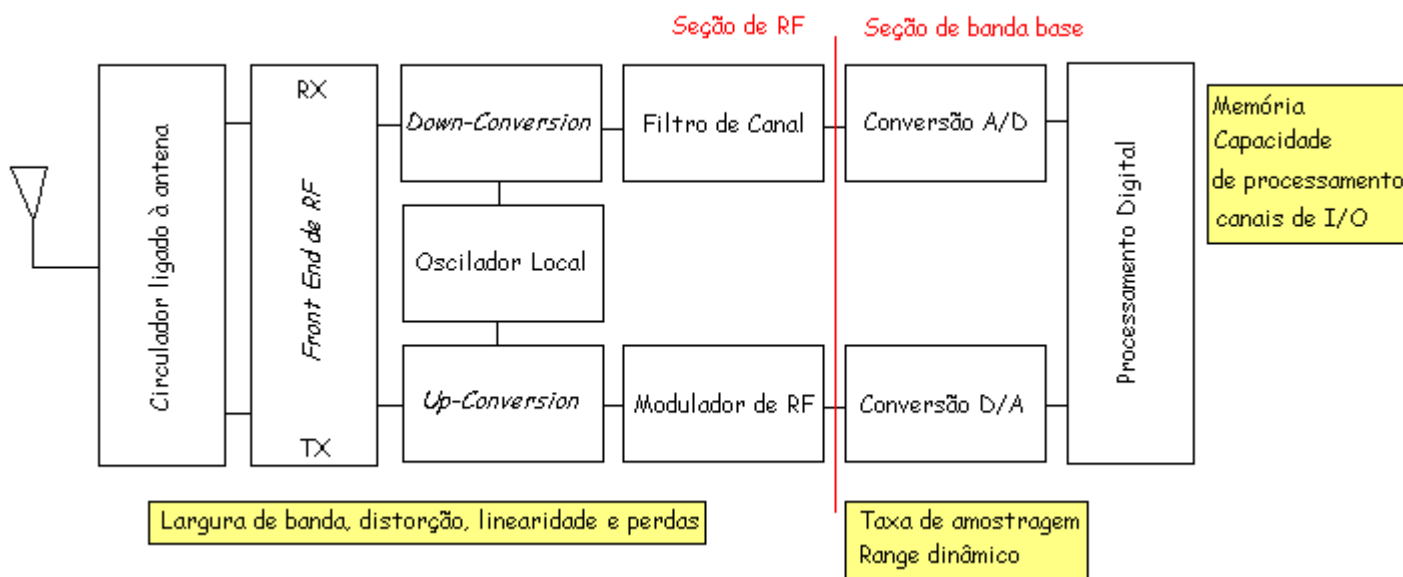


FIG.2- Plataforma de Hardware de referência com os seus respectivos parâmetros críticos.

A meta a ser atingida no desenvolvimento de uma plataforma de rádio SDR é de desenvolver, primeiramente, um *front-end* que integra em si tecnologia de RF de banda larga, alta tecnologia de processamento digital e softwares complexos orientados a objeto que regem esse processamento. Com esta arquitetura pronta será possível estabelecer uma plataforma de rádio totalmente flexível além de se desenvolver uma base tecnológica para o desenvolvimento do 3G. A meta consiste em construir esta arquitetura com alta qualidade e um custo acessível à população, além de suportar todas as interfaces de propagação existentes.

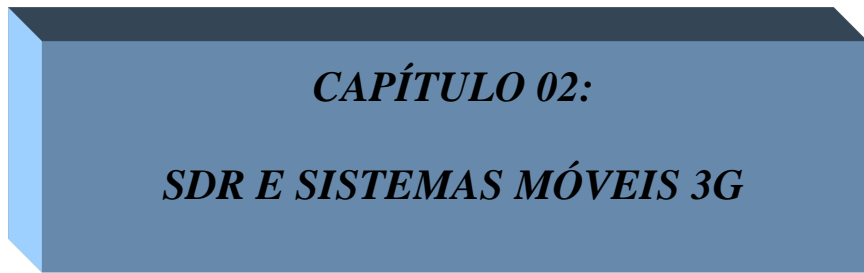
O desenvolvimento do SDR proporcionará a adição fácil de novos padrões e novas mudanças, devido à suas principais características que é ser programável e reconfigurável.

Este desenvolvimento irá abrir novas possibilidades, tanto no aspecto de oferta de serviços sem fio à população quanto no aspecto econômico, de regulação do uso de

espectro de frequência, entre outros. No entanto, Os fabricantes acreditam que um SDR funcionando completamente: *front-ends* (RF-DIGITAL-SOFTWARE) e ERB's (Estação Rádio Base) só será possível em 7 ou 10 anos [4]. De qualquer forma, o SDR é uma área de pesquisa muito ampla e cujos resultados podem trazer muitos benefícios na área de comunicações móveis. Por exemplo, na Europa, o sistema móvel 3G é visto como o carro chefe para desenvolvimento de produtos [7]. Neste aspecto, o SDR é uma área de pesquisa muito importante pois pode oferecer a migração do GSM para o UMTS.

Outro benefício que poderá ser trazido pelo desenvolvimento do SDR, que será analisado mais profundamente no capítulo 05, é o fato deste ser capaz de tornar possível um uso mais efetivo e eficiente do espectro eletromagnético. Ao se desenvolver o radio via software será possível o aparecimento de sistemas adaptativos e auto-gerenciáveis que oferecerão grandes melhorias na eficiência de espectro e no seu reuso em tempo real. A característica central destes sistemas inteligentes será o controle das funções de rádio através de algoritmos, afetando a utilização do espectro eletromagnético. Estes sistemas deverão ser, como dito anteriormente, adaptativos, auto-gerenciáveis e versáteis para satisfazerem o requerimento global de capacidade de operação “em qualquer lugar, a qualquer tempo, em qualquer frequência”.

Enfim, a implementação do *Software Defined Radio* tornará possível vários benefícios como características técnicas e de operação mais eficientes, expansão de serviços como serviços de banda larga e multimídia, custos de operação reduzidos e um sistema de comunicação mais flexível, adaptativo e interoperável. Outro aspecto importante é que com o desenvolvimento do SDR, as plataformas de hardwares terão um tempo de vida maior, demorando mais para ficarem obsoletas já que as principais funções serão definidas por um software. No entanto, o tempo de vida da plataforma de hardware do SDR não será aumentado indefinidamente pois, como ocorre com os computadores pessoais, será necessário mudar eventualmente a plataforma de hardware para que esta suporte softwares cada vez mais poderosos, que requeiram maior capacidade de processamento.



CAPÍTULO 02:
SDR E SISTEMAS MÓVEIS 3G

2.1- SISTEMAS MÓVEIS DE TERCEIRA GERAÇÃO:

Num futuro próximo, mobilidade se tornará um aspecto fundamental de muitos serviços. Os consumidores irão querer acesso a Internet de alta velocidade, serviços de entretenimento, informação e comércio eletrônico onde quer que estejam. Em palavras simples, os sistemas móveis 3G combinam acesso móvel a serviços baseados em Protocolo de Internet (IP). Mas isso não significa apenas conexão móvel rápida à *World Wide Web*, mas também formas totalmente novas de comunicar, acessar informações e conduzir negócios livres de equipamentos incômodos e pontos de acesso imóveis.

Já se trabalha intensamente no desenvolvimento da terceira geração, que tem como objetivo oferecer dados comutados em pacotes para um terminal de computador de mão, com uma capacidade avaliada em centenas de Kbps. Um sistema móvel de terceira geração em desenvolvimento está sendo denominado UMTS (Universal Mobile Telecommunications System). Neste sentido, progressos significativos já foram obtidos, como por exemplo a reserva de 230 MHz de espectro, com a aprovação de 127 países, na "World Administrative Radio Conference" (WARC) em 1992. Foi neste mesmo ano que a ITU (International Telecommunications Union) começou a trabalhar em um padrão denominado IMT-2000 (Telecomunicações Móveis Internacionais). O número 2000 inicialmente tinha três significados: O ano em que o serviço deveria estar disponível, o alcance da frequência em MHz que seria utilizada e a velocidade de transmissão de dados em Kbps. O nome permaneceu, embora todos esses critérios tenham sido eventualmente abandonados. O ano do lançamento foi adiado para 2002, a América do Norte já está utilizando as frequências recomendadas para outros serviços, e a transmissão de dados em altas velocidades estará disponível apenas em pico células.

A ITU concebeu o IMT-2000 (que terá pelo menos três modos de operação, sem a garantia de que estes serão compatíveis entre si) como um padrão global único, mas os regulamentadores, distribuidores e as operadoras do mundo não foram capazes de chegar a um consenso. O desenvolvimento dos sistemas móveis 3G vai ser gradual e todos desejam se assegurar de que ela vai oferecer compatibilidade com seus sistemas já existentes.

O objetivo do UMTS é prover um padrão universal para as comunicações pessoais com o apelo do mercado de massa e com a qualidade de serviços equivalente à rede fixa.

Na visão UMTS, um sistema de comunicações deverá suportar diversas facilidades: (1) portadoras realocáveis, banda atribuível sob demanda (por exemplo, 2 Mbps para comunicações em ambientes internos e pelo menos 144 kbps para ambientes externos); (2) variedade de tipos de tráfego compartilhando o mesmo meio; (3) tarifação adequada para aplicações multimídia; (4) serviços personalizados; (5) facilidade de implementação de novos serviços; (6) WLL (Wireless Local Loop) de banda larga, etc. O WLL de banda estreita tem sido utilizado em substituição aos fios/cabos de cobre para conectar telefones e outros dispositivos de comunicação com a rede de telefonia comutada pública, ou PSTN (Public Switched Telephone Network).

Dois dos modos do padrão IMT-2000 têm como base o CDMA (Acesso Múltiplo por Divisão de Código). Um sistema CDMA em uso é o cdmaOne, desenvolvido pela Qualcomm, mas que atualmente está sendo supervisionado por uma organização independente denominada CDG (Grupo para o Desenvolvimento do CDMA). Esse sistema foi padronizado pela TIA (Associação das Indústrias de Telecomunicações), como IS-95a, e é muito popular entre as operadoras de celulares nos Estados Unidos e na Ásia. Pelo fato desse sistema já utilizar o padrão CDMA, sua atualização para a 3G é mais fácil se a compararmos aos sistemas rivais, que têm como base o padrão TDMA (Acesso Múltiplo por Divisão no Tempo).

O sistema cdmaOne distribui todos os sinais acima da frequência de 1,25 MHz, transmitindo em largura de banda integral de uma vez. Ele utiliza um conjunto de 64 códigos, conhecidos como seqüências Walsh. Portanto, em teoria, um grupo de até 64 usuários poderia utilizar um canal ao mesmo tempo. Na prática, esse número depende da taxa de transmissão de dados. O sistema básico oferece voz e frequência de transmissão de 14,4 Kbps, facilitando a comunicação entre cerca de 15 a 20 usuários. Uma atualização denominada IS-95b oferece uma velocidade de até 115 Kbps, o que significaria apenas dois usuários por canal.

Para o padrão IMT-2000 alcançar o objetivo de 2 Mbps, os sistemas CDMA precisam utilizar mais códigos, um esquema de modulação diferente e larguras de banda mais amplas. A atualização oficial, desenvolvida pela Qualcomm e ratificada pela ITU, é conhecida como cdma2000 3XMC. O número 3 vem de sua largura de banda, 3,75MHz, o resultado de três canais de 1,25MHz do cdmaOne combinados.

Como uma etapa intermediária, a maioria das operadoras do cdmaOne está implementando uma tecnologia denominada cdma2000 1XMC, que utiliza os mesmos canais de 1,25MHz. Ele duplica o número de códigos para 128, aumentando portanto, a taxa de transmissão de dados por usuário ou o número de usuários em uma célula. A Qualcomm e a Motorola estão também incorporando esquemas rivais que aperfeiçoam o padrão 1XMC, conhecidos respectivamente como High Data Rate (HDR) e 1Xtreme.

Uma outra linha de pensamento defende que a evolução em direção aos serviços de telecomunicações móveis universais, UMTS, muito provavelmente, deverá ter como base a estrutura do GSM. Econômica e tecnicamente falando, a criação de um padrão independente para o UMTS seria injustificável dado o enorme investimento para a viabilização das redes celulares digitais já em uso. O GSM é visto como uma base de evolução para o UMTS porque já atende a alguns dos requisitos deste último. No entanto, é razoável que o emprego em larga escala da tecnologia não seja o único fator a ser ponderado na adoção de padrões. Especificamente em relação ao UMTS, três requisitos são de primordial importância: (1) rádio acesso de banda larga; (2) *roaming* inteligente; e (3) alta capacidade. O GSM, em sua evolução natural, tem plenas condições de atender a esses requisitos.

2.2- TECNOLOGIA SDR E EVOLUÇÃO PARA SISTEMAS 3G:

Como visto anteriormente, o maior benefício oferecido pelo desenvolvimento da tecnologia SDR é o de se criar uma base tecnológica para a evolução dos sistemas de comunicação móvel de 2G para 3G, devido à sua grande flexibilidade. O principal objetivo do sistema 3G é promover um único conjunto de padrões que possam servir a uma gama de aplicações de serviços sem fio e promover um acesso universal. Neste cenário, tem-se um *front-end* que dará acesso a uma variedade de serviços como voz, dados e serviços de comunicação em vídeo. O sistema 3G irá utilizar a “Broadband Integrated Services Digital Network” (B-ISDN) para promover acesso às redes de informação, como por exemplo, a internet.

Existe uma tendência para o mercado mundial de comunicação móvel, de implementar, como na Europa, o UMTS (Universal Mobile Telecommunication System) como sistema de 3G [7]. O UMTS é um sistema capaz de prover uma grande variedade de serviços móveis para uma grande variedade de padrões de comunicação móvel. Para que este possa suportar um combinado de tráfego, um combinado de células, divididas em macro, micro e pico células está sendo considerado. O tráfego local será efetuado nas micro e pico células e o tráfego pesado nas macro células. A cobertura de rádio será dada por uma rede de estações rádio base interconectadas entre si e com uma rede de informações. Uma MAN (Metropolitan Area Network) está sendo considerada, para ser essa rede de informações.

O padrão internacional para sistemas 3G inclui 5 interfaces de rádio [8]. É desejável que essas interfaces possam operar em todo lugar para que seja caracterizado o *roaming* global. Também é requerida uma compatibilidade com os sistemas 2G como por exemplo, IS-136, GSM e IS-95, pois estes, inicialmente, irão continuar em operação, mesmo depois de implantado o sistema 3G.

Para que seja possível um *front-end* pequeno mas que faça um *roaming* global, este deverá ter uma estrutura parametrizada para o processamento da banda base. O processamento em banda base será feita em um hardware reconfigurável como FPGA ou DSP, com seus parâmetros definidos via *download* de software.

As interfaces de ar a serem incluídas no sistema de comunicação móvel global 3G serão:

- Direct Spread (UTRA-FDD);
- Multi Carrier (CDMA 2000);
- Time Code (UTRA-TDD);
- Single Carrier (UWC-136);
- Frequency Time (DECT);

Estas interfaces de ar fazem parte da família IMT-2000, que é o sistema de comunicação global de terceira geração. Os operadores estão livres para escolher uma ou

mais interfaces de rádio da família IMT-2000 para o uso nas bandas de frequência reservadas na região de 2GHz.

Pode-se observar que um sistema de comunicação global, sugerido pela concepção dos sistemas 3G, só será possível com uma tecnologia que aceite e se adapte a todos os padrões, pois a definição de um padrão global é muito difícil. Por exemplo, na África do Sul, o SATRA (South African Telecommunication Regulatory Authority) definiu em 1997 as bandas de 1885-2025 e 2110-2200MHz para UMTS/ FPLMTS (Future Public Land Mobile Telecommunication Systems) e para o IMT-2000 as bandas de 1885-1980 e 2110-2170 MHz [7]. No entanto, para que estas bandas sejam utilizadas é necessária uma migração de outros serviços que as utilizam, por exemplo, a Telkon as utiliza para DECT WU. Portanto, tendo em vista que em cada região existe uma tendência de sistemas a serem escolhidos para a evolução e uma variação na destinação da frequência, um sistema adaptativo e flexível como o SDR seria o mais indicado para esta evolução.

Desta forma, a maior razão para se desenvolver uma estrutura parametrizada é o fato de esta permitir um *handover* intersistemas como por exemplo, entre o GSM e UTRA. Para este *handover* intersistemas é necessário que de tempos em tempos a estação móvel meça a qualidade de recepção nas bandas de frequência de outros sistemas. Isto pode ser feito nos intervalos entre *bursts* de recepção e de transmissão. Em um sistema WCDMA, como o UTRA-FDD usualmente as estações móveis recebem e transmitem continuamente. No entanto, foi criado um modo de transmissão comprimido no UTRA, onde a informação que seria mandada em um quadro de 10ms será transmitida em um tempo menor. Este tempo vago pode ser usado para medidas em outras frequências. Porém, para manter a BER, a potência do sinal em modo comprimido deve ser maior, o que pode afetar outros usuários.

O SDR com um receptor comum e com processamento de banda básica parametrizada em DSP e FPGA é uma solução pragmática. Atende aos requerimentos dos sistemas 3G de flexibilidade e é realizável atualmente, se for considerado um número restrito de sistemas a serem implementados. Adicionado a isto, a utilização de uma parametrização via software em um hardware reconfigurável reduz muito o tamanho deste.

Para o mercado de comunicação móvel, restringir o desenvolvimento do SDR a um conjunto de sistemas que só serão utilizados na próxima década é o suficiente. Mesmo

porque, um receptor comum com uma conversão A/D de banda larga e alta resolução só são realizáveis atualmente para uma seleção finita de sistemas.

2.3- UTILIZAÇÃO DO RECEPTOR COMUM:

As bandas de frequência alocadas de acordo com os padrões definidos para os sistemas 2G e 3G estão entre 800MHz e 2200MHz. As bandas dos sinais estão entre 25kHz (Pacific Digital Cellular –PDC) e 5MHz (UMTS) [8]. Será assumido que diferentes padrões não utilizam o mesmo intervalo de frequências simultaneamente no mesmo lugar, tornando possível que o padrão seja escolhido no receptor pelo oscilador local.

Um dos pontos mais característicos do receptor SDR é que o conversor A/D deverá ser colocado o mais próximo possível da antena. Mas isto não quer dizer que este será o primeiro estágio. Porque se fosse, este deveria apresentar uma resolução de banda muito maior que o necessário e uma frequência de amostragem muito alta, aumentando seu custo sem necessidade. Evitar uma segunda frequência intermediária no receptor SDR levaria a um conversor A/D inatingível nos dias de hoje, se pensarmos no caso de um sinal UMTS.

Na figura 3, tem-se uma possibilidade para um receptor SDR:

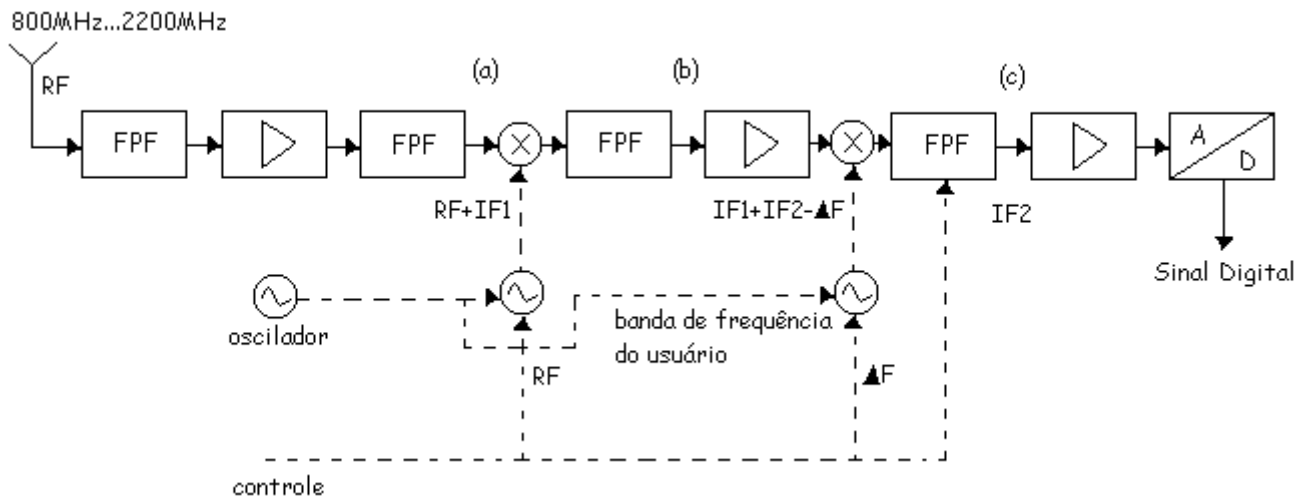


FIG.3- Parte de RF do receptor SDR

Chegando pela antena o sinal é filtrado por um filtro de pré-seleção que filtra a banda de 800MHz a 2200MHz em consideração. Depois, o sinal é amplificado, filtrado novamente para se retirar os espúrios introduzidos pelo amplificador e deslocado para a

primeira frequência intermediária (IF1). A frequência RF a que se refere as figuras 3 e 4 é considerada como sendo a frequência central da região do espectro alocada para um certo tipo de sistema celular. O primeiro misturador do receptor é sintonizado pela frequência RF e sua saída é a frequência $RF+IF1$. Depois de se deslocar o sinal em frequência, este é filtrado por um filtro passa-faixa que deixa passar somente as frequências alocadas para o padrão (Fig.4b). As larguras de banda que devem ser implementadas pelo filtro IF1 são dadas na tabela 01. Depois de filtrado, o sinal é novamente amplificado e misturado uma segunda vez com a frequência $F=IF1+IF2-\Delta F$, onde IF1 e IF2 são frequências intermediárias fixas enquanto que ΔF é a diferença entre a portadora do sinal a ser recebido e a frequência central da banda. Esta diferença é dada pelo controle do receptor. Na saída do segundo misturador, a frequência da portadora do sinal a ser recebido é passada para IF2. Depois de ser filtrado por um filtro passa-faixa, o sinal é limitado à largura de banda do canal do usuário.

Para se sintonizar o filtro na primeira frequência intermediária, pode-se fixá-lo para a maior largura de banda IF1, que é, segundo a tabela 1, 140MHz. Depois do filtro IF2 o sinal é amplificado de novo para atender ao nível de potência requerido na entrada do conversor A/D. A conversão A/D é feita na segunda frequência intermediária. Sabendo-se que a largura máxima de canal é de 5MHz e que existem conversores analógicos- digitais com uma taxa de amostragem de $f_s=12,8\text{MHz}$, com uma resolução de, no mínimo, 12 bits, observa-se que a menor frequência IF2 possível é de 9,6MHz.

Um receptor como este mostrado pode ser construído usando-se componentes disponíveis atualmente. O progresso na conversão analógico- digital terá um importante impacto na evolução das arquiteturas de software via rádio.

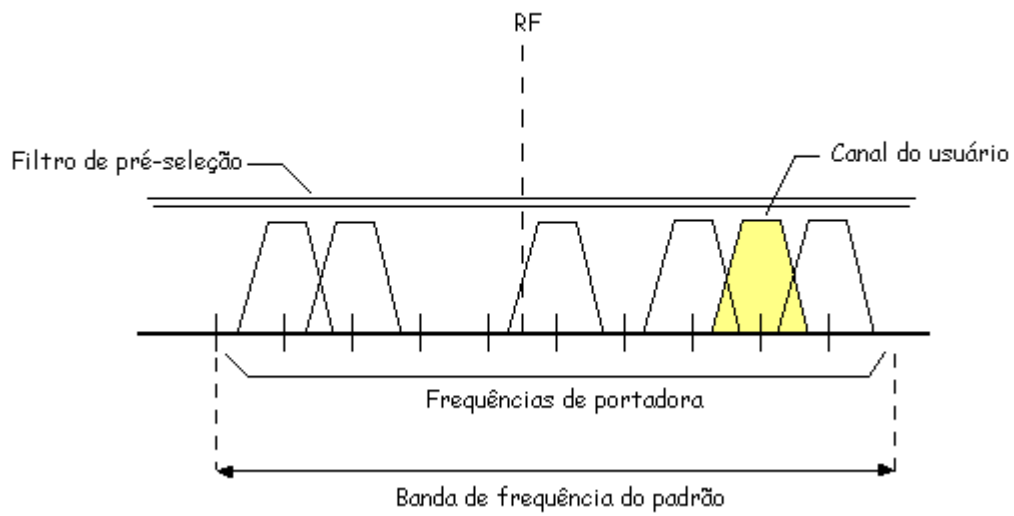


FIG.4a- Pré-seleção.

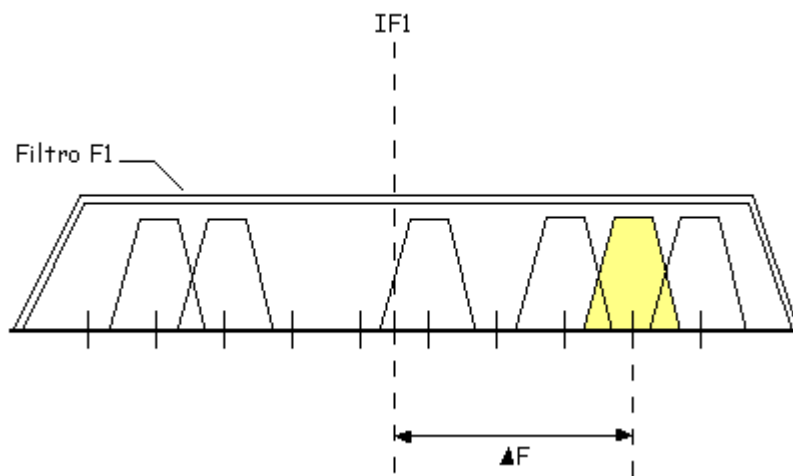


FIG.4b- Seleção da frequência IF1.

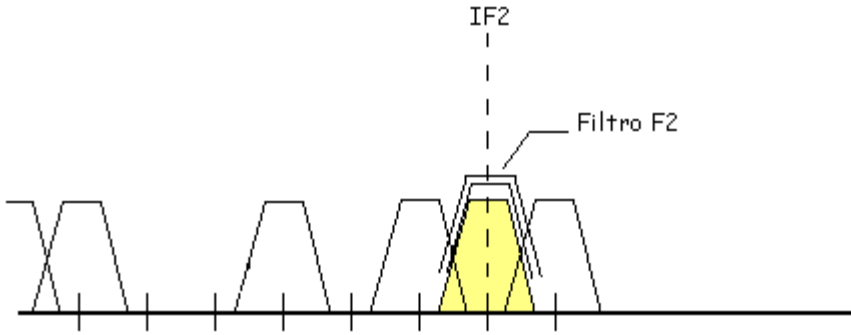


FIG.4c- Seleção da frequência IF2.

- 1- Filtro de pré seleção: Filtra toda a banda de 800-2200 MHz;
- 2- Mixer: Desloca a banda para frequência intermediária 1 (padrão);
- 3- Mixer: Desloca a banda para frequência intermediária 2.

Tabela 01- Largura de bandas dos filtros IF1 e IF2.

	Padrão	Largura de banda do filtro IF1(MHz)	Largura de banda do filtro IF2 (MHz)
Celular	GSM	35	0,27
	GSM 1800	75	0,27
	PDC	16;24	0,025
	IS-136	25	0,03
	IS-95	25	1,25
	UMTS	140;90	5
Cordless	DECT	20	1,726
	PHS	23	0,3
	PACS	60	0,3



CAPÍTULO 03:
ARQUITETURA SDR

3.1- ARQUITETURA DO SDR:

Definir uma arquitetura para o SDR é uma questão desafiadora, tendo em vista que vários requerimentos desta não podem ser atendidos com a tecnologia atual. Adicionado a isto, se alguns dispositivos já estão tecnologicamente desenvolvidos para atender a estes requerimentos, outros, menos desenvolvidos, podem se apresentar como um gargalo na arquitetura. Isto quer dizer que, como é necessário que o conjunto dos dispositivos de RF, conversão analógico- digital e processamento digital de sinais bem como os módulos de software funcionem em conjunto, se um destes não apresentar o desenvolvimento tecnológico requerido todo o sistema será limitado em sua performance. Apesar destas limitações, estudos para a definição de uma arquitetura SDR estão sendo feitos em busca de se atingir um serviço de rádio de alta qualidade, flexível, robusto e acessível financeiramente.

Pode-se tomar como uma definição de arquitetura um conjunto de funções compreensíveis e consistentes, de componentes e de regras de *design* de acordo com cada sistema de comunicação via rádio que poderá ser organizado, desenhado, construído, operado e desenvolvido com o passar do tempo [4]. Esta definição de arquitetura pressupõe a utilização de hardwares do tipo *plug and play*, de forma que mudanças possam ser facilmente adicionadas a ela. A Arquitetura deve definir funções e componentes de forma que as funções sejam claramente associadas aos componentes e que as interfaces físicas entre os componentes correspondam a interfaces lógicas entre as funções.

Para uma arquitetura suportar módulos de hardware e de software do *tipo plug and play* de diferentes fornecedores, estes devem ser capazes de trabalhar juntos quando conectados em um sistema pré- existente. Os hardwares *plug and play* podem beneficiar a indústria de rádio por sua alta adaptabilidade, que facilita a inserção de novas tecnologias, caracterizando, assim, uma arquitetura aberta. No entanto, para que estes sejam utilizados é necessário que haja uma concordância entre todos os ramos da indústria de arquitetura.

O SDR tem, por definição, uma arquitetura baseada em software de grande escala e complexo. No entanto, o que se observa é que somente o conhecimento sobre a codificação de um algoritmo em linguagem C em um DSP não é suficiente para se desenvolver uma

arquitetura SDR, tendo em vista que a mesma também requer profundos conhecimentos em RF.

Na definição de uma arquitetura para o SDR, um dos parâmetros mais críticos é a comparação entre o acesso digital à banda e a flexibilidade da plataforma de processamento. O acesso digital de banda larga é, pelo critério de Nyquist, de metade da taxa de amostragem do ADC. Existem atualmente ADC's com banda de 6 GHz. Desta forma, a digitalização do sinal de RF não é impossível. Se todo o processamento depois do ADC fosse conseguido com um processador GP (General Purpose) isto resultaria em um SDR ideal. No entanto, ADC's de banda larga consomem muita potência, o que é uma grande desvantagem se pensarmos no desenvolvimento de *front-ends* de comunicações móveis pessoais.

Outros parâmetros críticos no desenvolvimento da arquitetura do SDR são:

- Processamento de sinais em tempo real;
- Estabilidade computacional do software integrado;
- Acesso de RF;
- Acesso digital de banda larga;
- Processamento digital (flexibilidade e capacidade);
- Taxas de transmissão de dados nas interfaces entre os processadores.

Como dito no capítulo 1, o primeiro passo em direção ao desenvolvimento de uma arquitetura SDR é a definição de uma plataforma de rádio de referência tendo em vista o grau de programabilidade requerida. Este representa uma fronteira tecnológica que compreende uma mistura de ASIC, FPGA, DSP, processadores general purpose, ADC's e DAC's. A partir da definição desta plataforma de rádio de referência pode-se caracterizar qual é a demanda de processamento do software e confrontá-la com a capacidade de processamento do hardware, bem como controlar os parâmetros críticos destes.

Devem-se distribuir os parâmetros da plataforma por classe de componentes. Por exemplo, o parâmetro intervalo dinâmico está presente no ADC, como visto na figura 02 do capítulo 1. Também é necessário que se tome cuidado com a demanda de processamento

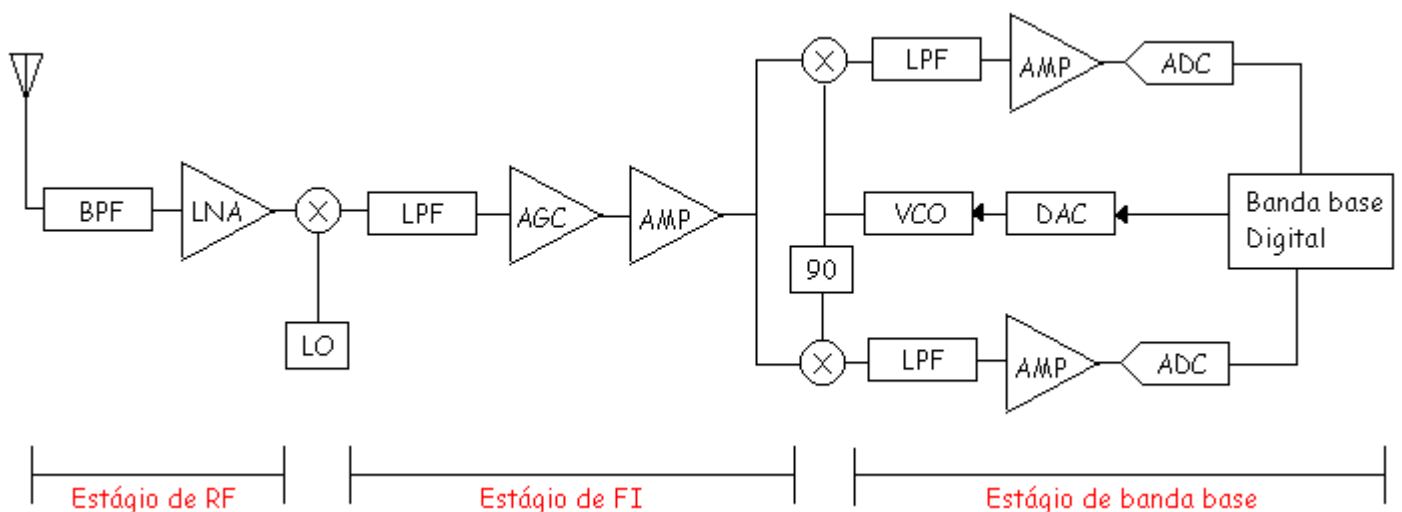
dos módulos de software pois estes devem estar de acordo com a capacidade de processamento do hardware.

Existem ainda muitas questões desafiadoras no desenvolvimento do SDR, como por exemplo, a digitalização de uma banda larga utilizando um único ADC e a extração individual de canais do sinal de banda larga digitalizado. No entanto, o sucesso do desenvolvimento desta arquitetura trará muitas vantagens. Além das citadas na introdução, também será possível se observar uma economia na construção de ERB's SDR, já que estas teriam um transceptor para todas as portadoras, ao invés de um individual para cada portadora. Além disso, uma vez desenvolvida uma arquitetura eficiente, a complexidade do SDR permanece inalterada, independentemente do número de canais.

3.2- O TRANSCEPTOR SDR:

Atualmente, transmissores e receptores empregados em sistemas de radio móvel são baseados no tradicional esquema super- heteródino, onde os estágios de RF e IF são totalmente analógicos. Neste caso, o componente digital está presente somente na banda base, utilizando-se usualmente ASIC's [11].

FIG.5- Receptor super- heteródino.



Por outro lado, o esquema ideal de um transceptor de radio via software tem um estágio analógico bem reduzido. Os únicos componentes analógicos são a antena, o filtro

passa-faixa e o amplificador de baixo ruído. A conversão analógico digital é feita imediatamente em RF para que se elabore o sinal digitalmente, em uma base reconfigurável.

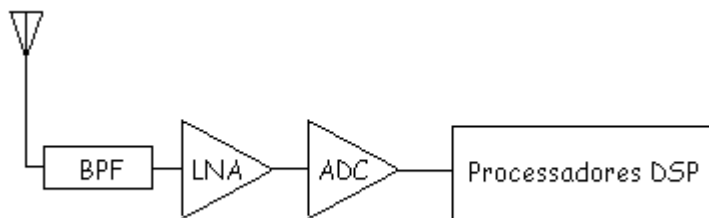


FIG.6- Receptor ideal SDR.

O transceptor SDR é definido como ideal porque existem muitos pontos que o tornam irrealizável no momento. Primeiramente, não é razoável se utilizar um único estágio de RF para um transceptor multi-banda devido à impossibilidade de se ter antenas e amplificadores com uma largura de banda que vai desde centenas de megahertz até dezenas de gigahertz. O único modo de se garantir a característica multi-banda é ter mais estágios de RF, dependendo da banda de radio utilizada para o sistema (por exemplo, 900 MHz para sistemas móveis de 2ª geração como GSM e 2 GHz para sistemas móveis de 3ª geração como UMTS). Em segundo lugar, a conversão A/D para sinais em RF é mais complexa devido ao *jitter*.

A solução mais promissora, até o momento, é a utilização de um transceptor de rádio digital, que tem sua estrutura muito parecida com um transceptor de banda larga, com o estágio de RF analógico e o estágio digital se estendendo até a frequência intermediária, como mostrado na figura 05 abaixo:

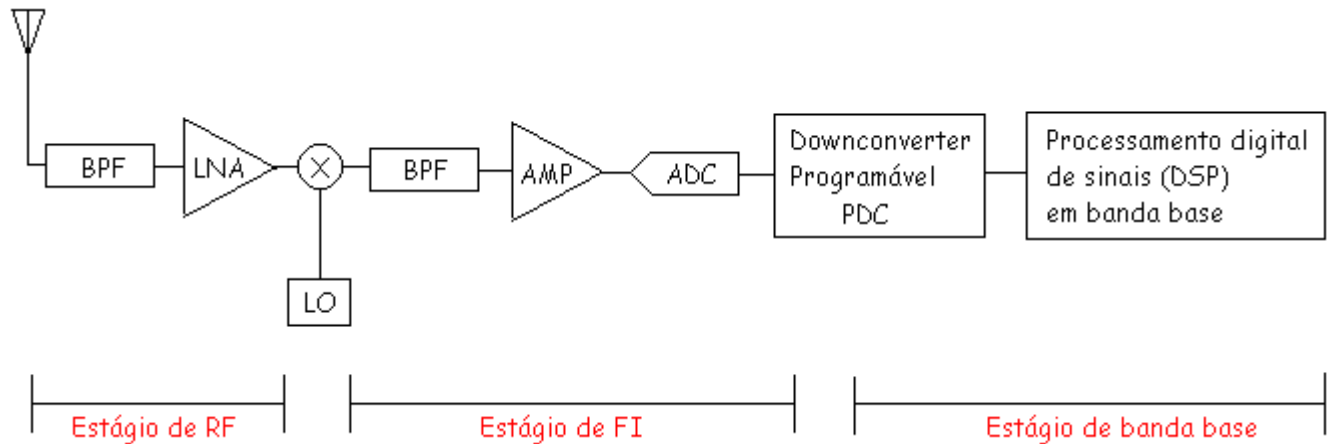


FIG.7- Receptor de rádio digital.

O conversor A/D amostra todo espectro alocado para o sistema, enquanto que o *downconverter* programável (PDC), que tem sua saída processada em banda base, fornece as seguintes operações:

- *Down* conversão: Conversão digital da frequência intermediária para a banda base, usando uma tabela contendo as amostras de uma portadora senoidal. Esta tabela substitui o oscilador local do transceptor analógico;
- Canalização: Seleção da portadora e do canal a serem elaborados pela filtragem digital. Essa operação em receptores analógicos é feita pelo filtro analógico antes da conversão para banda base;
- Adaptação de taxa de amostragem: Amostragem do sinal de saída da filtragem de canalização para casar a taxa de amostragem com a largura de banda do canal, que é de banda estreita em comparação com o espectro A/D de sinal de entrada.

O desenvolvimento de um transceptor de radio digital apresenta dificuldades em ambos os estágios de frequência intermediária e de banda base. Tanto para frequência intermediária quanto para RF, os desafios estão ligados à performance do conversor A/D e D/A, pois tem de haver uma escolha visando o compromisso entre taxa de amostragem e

resolução em bits. De fato, quanto maior a taxa de amostragem, menor é a resolução (número de bits que o conversor A/D usa para representar as amostras). A tecnologia atual permite atingir 10^9 amostra/s de taxa de amostragem com resolução entre 6 e 8 bits, baixando para 10^8 amostras/s com resolução de 10 bits, chegando a 150×10^3 amostras/s com resolução de 16 bits [11]. Se for escolhida uma taxa de amostragem alta, isso pode resultar em um número de bits insuficiente representando as amostras, levando em consideração que os sinais a serem amostrados podem apresentar uma grande amplitude dinâmica. Por exemplo, o sinal GSM tem uma amplitude dinâmica de , aproximadamente, 100dB (de -104dBm para o sinal mínimo de recepção até 13dBm). Outros problemas são a largura de banda de conversão, o *jitter* e os produtos de intermodulação causados pelo conversor. Em uma primeira avaliação, para se obter uma representação efetiva das formas de onda do GSM e do UMTS com suas amplitudes dinâmicas, seria necessária, no mínimo, uma resolução de 17 a 20 bits.

Mesmo em banda base, existem muitos aspectos tecnológicos a serem considerados, devido à capacidade de processamento necessária e o consumo de potência dos DSPs. A capacidade de processamento deve ser suficiente para permitir a execução em tempo real das interfaces de rádio implementadas via software. Isso pode levar ao uso de vários DSPs em paralelo, dependendo da complexidade da interface de rádio a ser implementada. Sabendo-se que um sistema de rádio via software deve se adaptar a diferentes padrões, é necessário dimensionar a capacidade de processamento para o pior caso. De fato, as soluções que adotam a detecção multi-usuário (Code Division Multiplex Access – CDMA) ou algoritmos *beam-forming* (antenas adaptativas) causam um crescimento exponencial na necessidade de capacidade de processamento (estimativa em unidades- dezenas de giga instruções por segundo – GIPS, para o UMTS). Isto também é afetado pelo tipo de funcionalidade requerida do DSP. De qualquer forma, os processadores general-purpose estão aumentando sua capacidade de processamento a cada ano e existem alguns que chegam a 1000 MIPS. A Texas Instruments, por exemplo, está desenvolvendo famílias de processadores que podem chegar a 1600 MIPS.

Outros parâmetros a serem otimizados no *design* da arquitetura dos DSP são o número de operações de I/O e o acesso a memória externa. O acesso a memória externa

reduz o número de operações e apresenta-se como o gargalo do sistema, anulando os esforços para alcançar uma alta capacidade de processamento dos DSPs.

Os DSPs usados para o processamento em banda base têm que lidar com barreiras precisas, principalmente se olhadas pela ótica do terminal do usuário como por exemplo, baixa complexidade do circuito, baixo custo, baixo consumo de potência e dimensões reduzidas do transceptor. Além disso, na banda base, existem aspectos de *design* que devem ser resolvidos em relação à escolha ideal das arquiteturas de hardware e software a serem adotadas.

Finalmente, tentando delinear um caminho de evolução para o desenvolvimento de um terminal de rádio via software, pode-se considerar três passos sucessivos:

- Passo 1: O terminal é capaz de realizar a codificação de canal e de fonte via software (com DSPs e FPGAs) enquanto que as seções de modulação e demodulação de banda base ainda são realizadas em tecnologia ASIC e as seções de RF e IF são circuitos analógicos tradicionais.
- Passo 2: O terminal é capaz de realizar via software além da codificação do canal, a modulação e demodulação de banda base (utilizando DSPs e FPGAs).
- Passo 3: O terminal é capaz de processar, além da codificação de canal e de fonte e a modulação e demodulação em banda base, sinais em frequência intermediária ou sinais de RF, obtidos através de um estágio de RF de banda larga, seguido de um estágio de conversão com alta resolução.

Uma das principais características de um transceptor SDR é a definição das funções do rádio fornecidas via software. Este será partilhado entre as unidades móveis e as estações rádio base e irá comandar a “personalidade” da unidade móvel e atualizar a infraestrutura. Maior flexibilidade é ganha, permitindo uma grande variedade de esquemas de modulação e codificação e vários padrões a serem implementados na mesma estação rádio base. Por este motivo, O SDR é capaz de suportar padrões incompatíveis como AMPS, GSM e CDMA. A substituição da utilização de um hardware dedicado por um reprogramável reduz a complexidade da estação rádio base e introduz flexibilidade e

independência para o sistema, resultando em menos espaço requerido e menor custo de manutenção devido à arquitetura integrada.

A escolha efetiva pelo *design* do SDR depende de fatores como: A tecnologia envolvida; O mercado (preço e rapidez com que deverá estar disponível); E no caso específico do mercado de telefonia celular, da arquitetura deste sistema como um todo. Neste, as ERB's terão de ser adaptadas para atuarem como “ provedoras” das quais se fará um *download* do software a ser utilizado em sua área de cobertura. No desenvolvimento destas ERB's, observa-se que não há restrições de espaço nem de consumo de potência. Mas, por outro lado, estas devem suportar múltiplos *links*.

De acordo com Mitolla [4], um SDR, constituído por *front-ends* e ERB's teria a seguinte configuração:

O *front-end* seria composto por: Fonte; Antena (certamente uma antena inteligente) ; Conversor de RF multi-banda; ADC e DAC em um único *chip*; Processador no *chip* e memória.

Front-end : Interface com o usuário e com o ar.

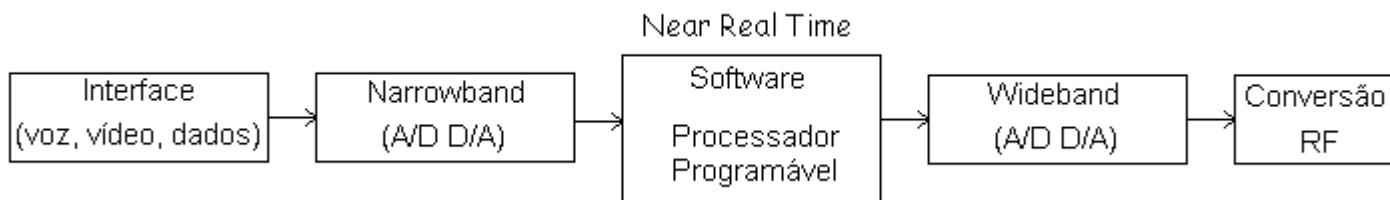


FIG.8- Conceito de um handset SDR expresso em diagrama de blocos.

ERB: Interface com PSTN (Public Switched Telephone Network) e com o ar.

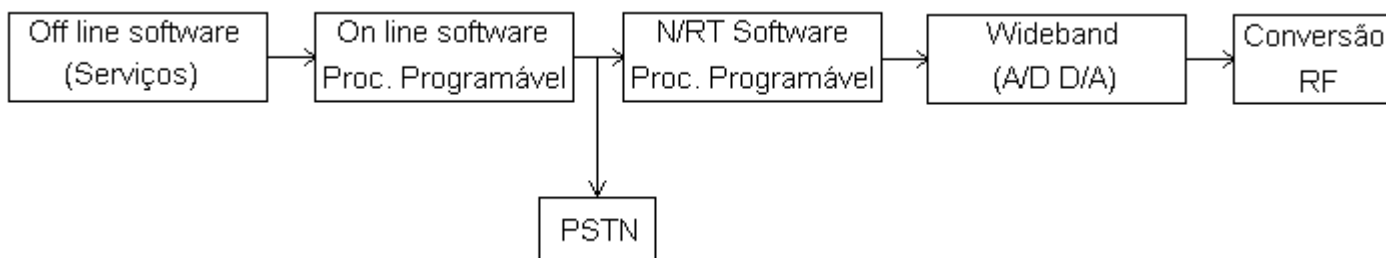


FIG.9 – Conceito de uma ERB SDR expresso em diagrama de blocos.

O SDR, para atingir seu objetivo de flexibilidade e adaptação a qualquer ambiente de radio, tem que se utilizar de tecnologia multi-banda. Isto quer dizer que o rádio deve acessar mais de uma banda de RF ao mesmo tempo. O codificador de canal de um rádio multi-banda inclui acesso ao canal de RF, processamento em frequência intermediária e modem (modulação e demodulação). O acesso ao canal de RF inclui antenas de banda larga e antenas inteligentes.

Rádios multi-modos geram múltiplas formas de onda de interface de rádio(modos) definidos no modem. A personalidade definida via software inclui: Banda de RF, canal (controle e tráfego), formas de onda de interface de rádio(modos de propagação) e funções relacionadas.

Codificação e decodificação inclui fontes de multimídia necessárias para nova geração de telefonia celular. Essas fontes de informação podem estar longe do nó de rádio, sendo conectadas a este via SDH, LAN, etc.

Todas as funções serão executadas por um multiprocessador que será orquestrado por uma unidade de controle que garantirá a estabilidade do sistema, fluxo de dados, etc. Esta unidade de controle terá de ter autonomia na seleção de banda, modo e formato dos dados.

Outra característica técnica que o SDR tem é a capacidade de realizar *beam-forming*, ou seja, a característica adaptativa de sua antena: Quanto mais ágil este for, mais usuários podem ser atendidos e com um maior QoS. Hoje em dia, o *beam-forming* requer processadores dedicados mas em breve poderá ser incluído em um algoritmo para um DSP.

3.3- CAMADAS DE APLICAÇÃO DO SDR:

Obviamente, as funções associadas ao funcionamento de um SDR não compartilham a mesma camada de aplicação. Deste modo, não é razoável pensar na arquitetura SDR como uma simples coleção de funções com interfaces associadas. É preciso também identificar as camadas de aplicação às quais tais funções fazem parte [4].

Na figura 10 abaixo, estão mostradas as camadas que formam a arquitetura SDR:

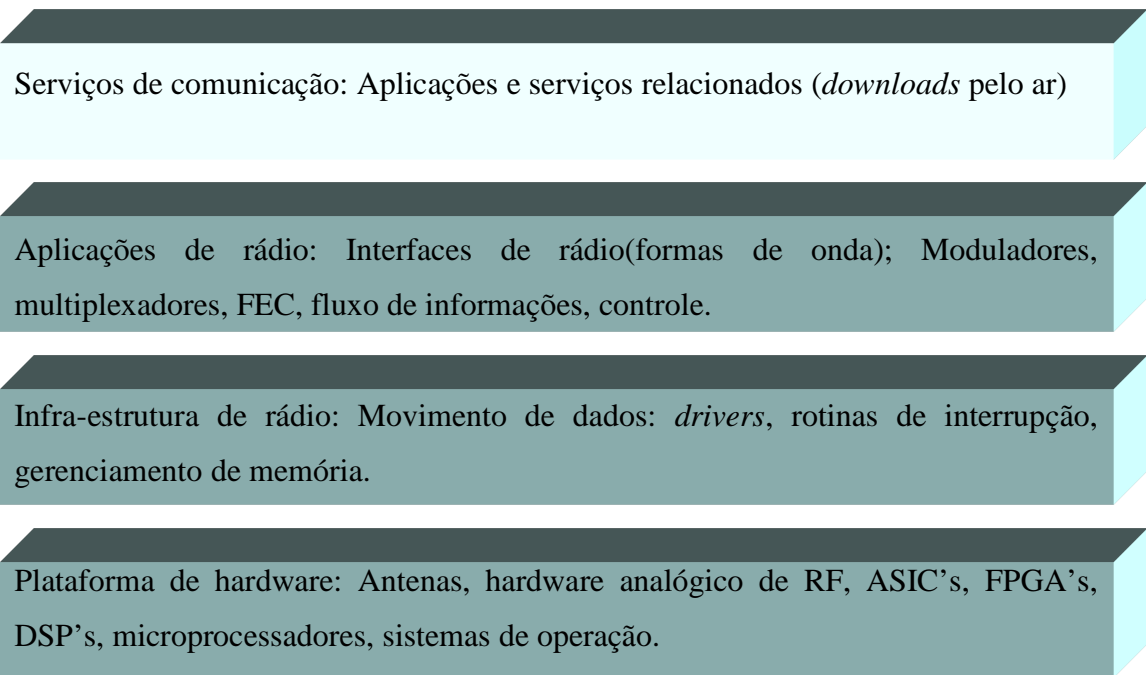


FIG.10- Camadas de aplicação do SDR.

Essas quatro camadas são âncoras conceituais para organizar o processo de desenvolvimento da arquitetura do rádio via software. É necessário, no entanto, que sejam definidas interfaces entre estas camadas. Uma interface necessária é uma interface de programação de aplicação (API), para ser uma interface vertical entre as camadas horizontais definidas na figura acima. Estas interfaces de programação devem ser realizadas de forma a permitir a comunicação entre softwares que não foram criados inicialmente para trabalharem em conjunto.

Definindo-se a *Interface Definition Language* (IDL) dentro do CORBA (Common Object Request Broker Architecture), os componentes farão a interface com este e não com os outros N componentes existentes tornando bem mais simples a integração de um novo componente de software. O CORBA IDL fornece modos flexíveis de se criar interfaces entre componentes funcionais.

As interfaces se dividem entre interfaces horizontais entre componentes funcionais de uma mesma camada e interfaces verticais entre as camadas de aplicação. Estas interfaces

dividem o software radio em uma matriz de componentes gerenciáveis. Estes componentes devem ser rigidamente integrados para criar um sistema com as propriedades desejadas.

3.4- POSSÍVEIS SOLUÇÕES PARA A IMPLANTAÇÃO DE UM RÁDIO VIA SOFTWARE:

O sistema de radio via software deve ser capaz de se adaptar a uma grande variedade de sistemas celulares, já padronizados ou a serem desenvolvidos no futuro, utilizando uma plataforma de hardware comum.

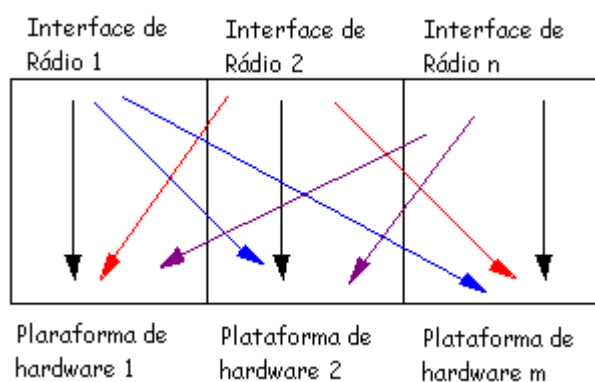


FIG.11- interoperação entre hardware e software em um sistema SDR.

O *design* do hardware será desenvolvido paralelamente ao *design* do software. Primeiramente, é requerida a escolha de uma arquitetura de software apropriada, por exemplo, software orientado a objeto com a respectiva linguagem de programação. O objetivo final é o projeto de bibliotecas de software que implementem interfaces de radio consideradas.

Os fabricantes tendem a fabricar produtos proprietários, ou seja, que são incompatíveis entre si. Deste modo, o radio via software representa uma forma de fazer a interface de radio independente da plataforma de hardware. É possível identificar três modos de se desenvolver um sistema de radio via software:

- Software proprietário para cada plataforma de hardware: Cada fabricante produz sua solução de hardware e software independente das outras companhias.

A vantagem para as companhias é a possibilidade de oferecer ao mercado um produto diferenciado em relação aos competidores, deixando que o mercado decida que produto terá sucesso. A desvantagem diz respeito aos operadores, pois terão que lidar com equipamentos não padronizados, devendo haver uma gerência de atualização de softwares nos terminais. Isto dificultaria muito o funcionamento do sistema porque cada usuário compraria livremente o terminal que quisesse e o operador deveria carregar naquele terminal o software correspondente;

- Padronização de uma plataforma de hardware comum: Esta solução simplificaria muito a situação, já que eliminaria todas as possíveis soluções proprietárias desenvolvidas pelos fabricantes. Nesta situação, haveria somente uma plataforma de hardware com somente um software a ser desenvolvido. Neste caso, a desvantagem recai sobre os fabricantes, que não conseguiriam diferenciar seu produto dos concorrentes;
- Compiladores residentes e/ou sistema de operação de padrões em tempo real: o compilador gera um código executável específico para a plataforma de hardware no qual o código vai ser executado. Este código executável é gerado partindo de um código fonte, que pode ser o mesmo para todas as plataformas de rádio. O código fonte poderá ser utilizado em qualquer plataforma. Esta solução é a mais razoável, haja vista elimina as desvantagens das outras soluções apresentadas e mantém suas vantagens.

Uma linguagem candidata a ser aquela do código fonte é o Java [11], com as devidas modificações para as necessidades de operação em tempo real. A Texas Instruments, por exemplo, já desenvolveu DSPs capazes de processar instruções em Java. A sua vantagem é que Java tem como princípio básico o fato de que as aplicações residem em um sistema remoto, enquanto que no sistema local o software é reduzido para diminuir o uso de memória. Quando é necessário, o sistema faz um *download* da aplicação. Para que o uso de Java tenha sucesso, é necessário que o software residente em um sistema remoto possa ser baixado e executado por qualquer sistema local. Isto é conseguido através de um

conjunto de instruções chamado de Java Kernel, que está residente no sistema local e é utilizado para interpretar a aplicação baixada pela rede.

De acordo com os conceitos acima, um sistema SDR pode ser ilustrado como uma estrutura em camadas como na figura 12. O sistema é completamente definido via software. A presença de um compilador residente permite a independência entre o hardware e o software.

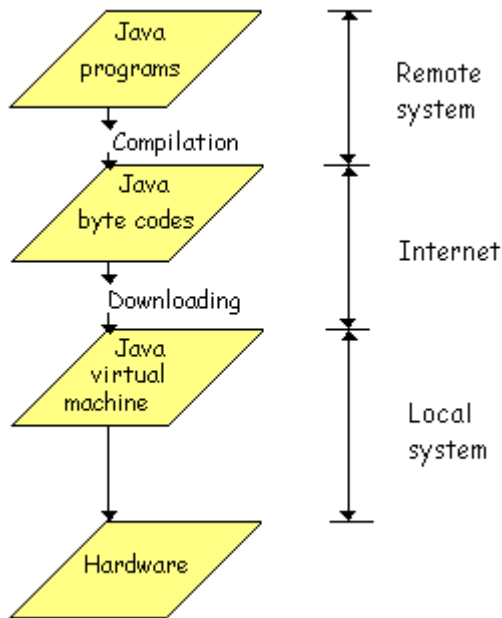


FIG.12- Execução de uma aplicação em Java.

Em uma estrutura em camadas, é necessário que as interfaces de programação de aplicação sejam padronizadas. Estas são chamadas de máquinas virtuais, que permitem que um mesmo software seja baixado em diferentes plataformas de hardware.

É importante notar que as interfaces de programação de aplicação (application programming interfaces – API) não são um código particular, um programa ou uma aplicação, mas sim uma descrição das relações lógicas entre softwares relacionados e módulos de hardware. Elas descrevem as relações entre os módulos, não a sua implementação, são independentes de uma aplicação em particular.

As bibliotecas de software serão divididas em módulos pertencentes às seguintes categorias funcionais:

- Módulos de processamento de sinais: Estes módulos de software implementam funções básicas como codificação e modulação;
- Módulos de controle em tempo real: Estes módulos supervisionam o fluxo de processamento e fazem o agendamento do processamento de sinais;
- Módulos de interface de hardware: Estes módulos gerenciam a entrada e saída de dados de/para o estágio de frequência intermediária.

3.5- DOWNLOAD DE SOFTWARE:

A implementação de uma interface de RF totalmente programável requer a definição de métodos de *download* do software. Do ponto de vista da estação radio base, um *download* de software é feito somente quando uma nova versão deste é feita. A atualização de software da estação radio base não é feita freqüentemente. Por outro lado, o *download* de software pelo terminal do usuário é crítico, tendo em vista que é feito freqüentemente devido à mobilidade deste ou de suas necessidades (o usuário pode querer mudar a interface de RF). O *download* de software do terminal deve ser rápido , fácil de ser executado e livre de erros. Em relação ao *download* de software, os *front-ends* podem ser classificados em [11]:

- Estático: O *front-end* suporta uma variedade de padrões e é programável de maneira estática, por exemplo, com um *smart card*. Vantagem: Livre de erros; Desvantagem: Não é transparente ao usuário e a taxa de transmissão de dados do *smart card* para o *front-end* deve ser rápida;
- Pseudo-estático: *Downloads over the air* (OTA) serão usados para pre-configurar o terminal para aceitar um protocolo ou aplicação;
- Dinâmico: Mais flexibilidade, utilizando *downloads* OTA, mas que podem ser feitos inclusive durante uma chamada.

Também pode-se ter um *download* por um equipamento periférico, que oferece a vantagem de ser livre de erros , de proporcionar menos complexidade do *front-end* mas tem a desvantagem de não ser transparente ao usuário.

Um *download* pelo ar tem a vantagem de ser transparente ao usuário e de proporcionar maior flexibilidade, no entanto, não é livre de erros e requer uma padronização especial para os softwares e também influi no aumento de complexidade do *front-end*.

Diante das possibilidades apresentadas, é relevante se analisar as duas principais formas de se realizar o *download*:

3.5.1- CARREGAMENTO DE SOFTWARE VIA SMART CARD:

O usuário adquire um *smart card* em um ponto de venda do operador do qual ele quer ser assinante. O *download* de software acontece quando o *smart card* é inserido no terminal do usuário. Pode haver alguns problemas quando o usuário necessita fazer *roaming* entre operadores que utilizam diferentes técnicas de *download*, fazendo com que o usuário tenha que comprar vários *smart cards* e utilizá-los à medida que for necessário. Uma solução para tal problema é instalar um equipamento apropriado em aeroportos, hotéis, estações de trem no qual o usuário pode reprogramar o *smart card* sempre que necessário.

As vantagens desta solução são:

- *Download* livre de erros;
- Não acrescenta *overhead* na rede;
- *Download* mais rápido do que o alcançável com um PC;

A principal desvantagem é que o *download* não é transparente ao usuário. De qualquer forma, o sucesso deste método depende de duas condições:

- Desenvolvimento de *smart cards* com memória suficiente para armazenar o software;
- Difusão de pontos de venda e de equipamentos para reprogramar o *smart card* em uma base territorial.

3.5.2- CARREGAMENTO DE SOFTWARE VIA INTERFACE DE RF:

O *download* de software é feito da rede em um canal dedicado. O procedimento de *download* é realizado pelo terminal do usuário e pela estação radio base. A maior vantagem deste método é que este não requer a participação do usuário. Por exemplo, uma atualização inteligente de software pode ocorrer automaticamente no terminal se o usuário está viajando em uma área que utiliza diferentes sistemas celulares.

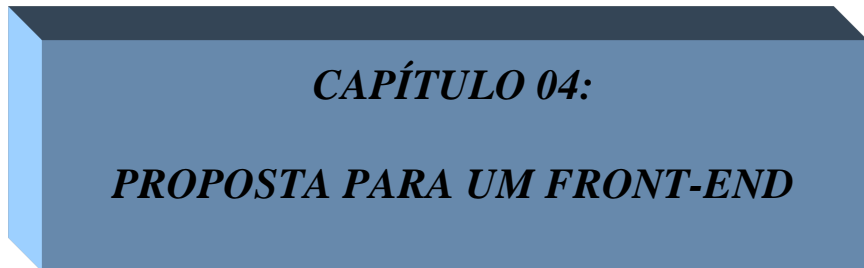
As desvantagens deste método são:

- Grande impacto na infra-estrutura de rede devido à necessidade de um canal dedicado para o *download* e a definição de um procedimento para este.
- Maior probabilidade de ocorrência de erros durante o *download*.
- Demora do procedimento: A velocidade deste depende do tamanho do software e da largura de banda do canal.
- Segurança e autenticação do terminal do usuário e do servidor de rede.
- Maior complexidade para o desenvolvimento dos *front-ends*.

Por arquitetura aberta se entende aquela em que as funções, interfaces, componentes e regras de *design* são definidas e publicadas. O forum SDR está tentando estabelecer padrões para arquitetura aberta de dispositivos sem fio *plug-and-play* voltados para SDR. Existe o desafio de equilibrar as necessidades genéricas da arquitetura aberta com as necessidades específicas dos segmentos de mercado. Os militares, por exemplo, enfatizam a segurança da informação enquanto que o mercado *wireless* enfatiza a rapidez na entrega do serviço. A aviação, por sua vez, enfatiza a diminuição do custo de produtos.

Sem dúvida, o SDR é visto como uma tecnologia para a efetivação de novos serviços, como a telefonia celular de 3ª geração. Diferentes segmentos do mercado precisam de diferentes implementações do SDR. Desta forma, o desenvolvimento da arquitetura ideal deverá levar em conta que o SDR acomodará produtos alternativos para diferentes soluções.

Portanto, é difícil sugerir, no momento uma única arquitetura mas podem-se delinear as questões técnicas focadas nos parâmetros da arquitetura que são desejados no mercado.



CAPÍTULO 04:
PROPOSTA PARA UM FRONT-END

4.1- INTRODUÇÃO:

Este capítulo trata de um primeiro passo em direção à construção de um *front-end* SDR. Neste primeiro passo, com a tecnologia disponível, deseja-se montar um transceptor de RF, com o desenvolvimento de filtros, amplificadores e misturadores de microondas. O objetivo deste receptor de RF será receber um sinal na frequência de *downlink* de 3,335 GHz com uma banda de, aproximadamente, 100 MHz e transladá-lo para uma frequência mais baixa, compatível com a capacidade de conversão analógico- digital. Do mesmo modo, o sinal entregue pela parte digital do transceptor deverá ser transladado para a frequência escolhida para o *uplink* de 3,215 GHz, estabelecendo deste modo uma banda de guarda de 120MHz entre *downlink* e *uplink*. A frequência 3,335 GHz foi escolhida por ser a frequência do link de microondas existente no LEMOM, tornando possível a realização de testes quando o protótipo estiver pronto.

Simultaneamente ao desenvolvimento da parte de RF do transceptor SDR, estará sendo desenvolvido a parte digital deste bem como os algoritmos que irão configurar os dispositivos que realizam o processamento digital de sinais. A dificuldade em se alcançar um *front-end* inicial para o desenvolvimento do SDR reside principalmente no fato de que não é fácil a integração das tecnologias de RF, processamento digital de sinais e de software em um único dispositivo e a obtenção de um funcionamento perfeito, com as três partes trabalhando harmoniosamente.

Neste projeto é proposto um circuito de microondas para a recepção e a transmissão de RF. Apesar de não ter sido finalizado a parte de RF do transceptor SDR, este projeto traça caminhos para seu desenvolvimento.

4.2- PROPOSTA DO CIRCUITO DE MICROONDAS:

Um circuito inicial para o desenvolvimento do transceptor SDR está mostrado na figura 13 abaixo:

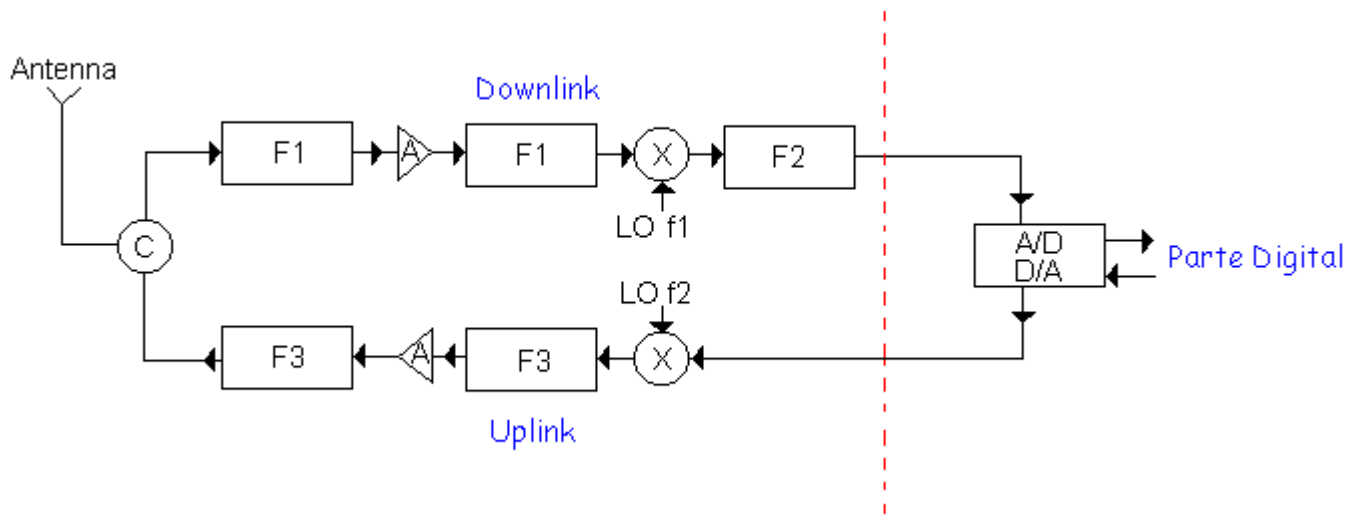


FIG.13- Circuito de microondas para o transceptor SDR.

Onde:

C é o circulador;

$F1$ é o filtro passa-faixa com $f_0 = 3,335$ GHz;

A é o amplificador com ganho de 12 dB;

$F2$ é o filtro passa-baixa;

$F3$ é o filtro passa-faixa com $f_0 = 3,215$ GHz.

A seguir, será descrita cada parte componente do circuito de microondas mostrado acima:

4.2.1- ANTENA:

A antena estabelece as bandas de RF disponíveis para que o transceptor SDR opere. A antena de um SDR ideal deveria ser uma antena banda larga, que operasse no maior número de frequências possíveis, para conferir ao SDR a sua principal característica de ser adaptativo ao ambiente de rádio em que se encontra. No entanto, quanto maior a largura de banda, mais se tornam desafiadoras características como VSWR e eficiência de transmissão. Embora muita pesquisa tenha sido feita no sentido de se criar uma antena que funcione em todas as bandas, os rádios multi-bandas geralmente requerem, no mínimo, uma antena por década de frequência de RF, por exemplo: HF; VHF; UHF e SHF. Adicionado a isto, a antena determina as propriedades do sistema receptor. Os diferentes tipos de antenas, como por exemplo setorizadas ou adaptativas (antenas inteligentes), possuem diferentes propriedades temporais e espaciais, das quais a mais significativa é o padrão de ganho de recepção e/ou transmissão. A interface entre a antena e a parte de RF determina a VSWR, a perda por inserção e outros tipos de perda. Em bandas acima de 100MHz, essa interface pode determinar o ruído presente em todo o sistema. Com o aumento da largura de banda da antena, a potência do ruído térmico cresce linearmente.

A antena que será provavelmente utilizada nos transceptores SDR serão as antenas inteligentes, por serem antenas adaptativas e, oferecerem assim, uma maior flexibilidade que é principal característica a ser buscada. No entanto, no presente projeto, estas não foram objeto de estudo.

4.2.2- CIRCULADOR:

O circulador é um dispositivo de microondas de três portas que funciona como uma

$$[S] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

chave seletora, que irá direcionar os sinais que entram em uma de suas portas para somente uma das outras duas [3]. A matriz de espalhamento de um circulador ideal é mostrada:

Ou seja, de acordo com a matriz espalhamento acima, todo sinal inserido na porta 01 será totalmente transferido para porta 02; Todo sinal inserido na porta 02 será totalmente transferido para porta 03 e todo sinal inserido na porta 03 será totalmente transferido para a porta 01. Esta matriz mostra que não há transmissão de potência no sentido inverso.

Os circuladores também podem ser utilizados como isoladores se uma das portas forem casadas com uma carga.

Neste transceptor, o circulador tem o objetivo de transferir todo sinal captado pela a antena para o ramo de *downlink* (porta 01 para porta 02) e também de transferir todo sinal que sai do ramo de *uplink* para a antena (porta 03 para porta 01).

4.2.3- FILTROS DE MICROONDAS:

Um filtro de microondas é uma rede de duas portas usada para controlar a resposta em frequência em um certo ponto de um sistema de microondas fornecendo transmissão em frequências que se encontram na banda passante do filtro e atenuação na banda de rejeição [3]. O conceito da construção de um filtro de microondas se baseia nas características de estruturas periódicas, que consistem de guias de onda periodicamente carregado com elementos reativos.

Nesse trabalho, projetaram-se os filtros F1 e F3, como descrito a seguir:

- **Filtro F1:**

O filtro F1 é o que vai filtrar a banda de frequência do *downlink*, tendo como características:

$$F_0 = 3,335 \text{ GHz};$$

$$B = 4\% = 100,05 \text{ MHz};$$

$$L_i \leq 1 \text{ dB};$$

$$L_r \geq 24 \text{ dB};$$

$$NF \leq 4 \text{ dB}.$$

A tecnologia escolhida para a construção do filtro foi Microstrip com resposta do tipo Butterworth. A vantagem da utilização de Microstrip é que esta permite a integração com dispositivos discretos mais facilmente, apesar de apresentar menos blindagem em relação à stripline. O filtro é do tipo Hairpin Line Miniaturizado, que se utiliza do

acoplamento de ressoadores para fornecer a resposta desejada. Foi utilizado o software Filtros, desenvolvido como projeto final pelo aluno Rodrigo Neves Martins.

Abaixo tem-se a estrutura do filtro bem como sua resposta em frequência:

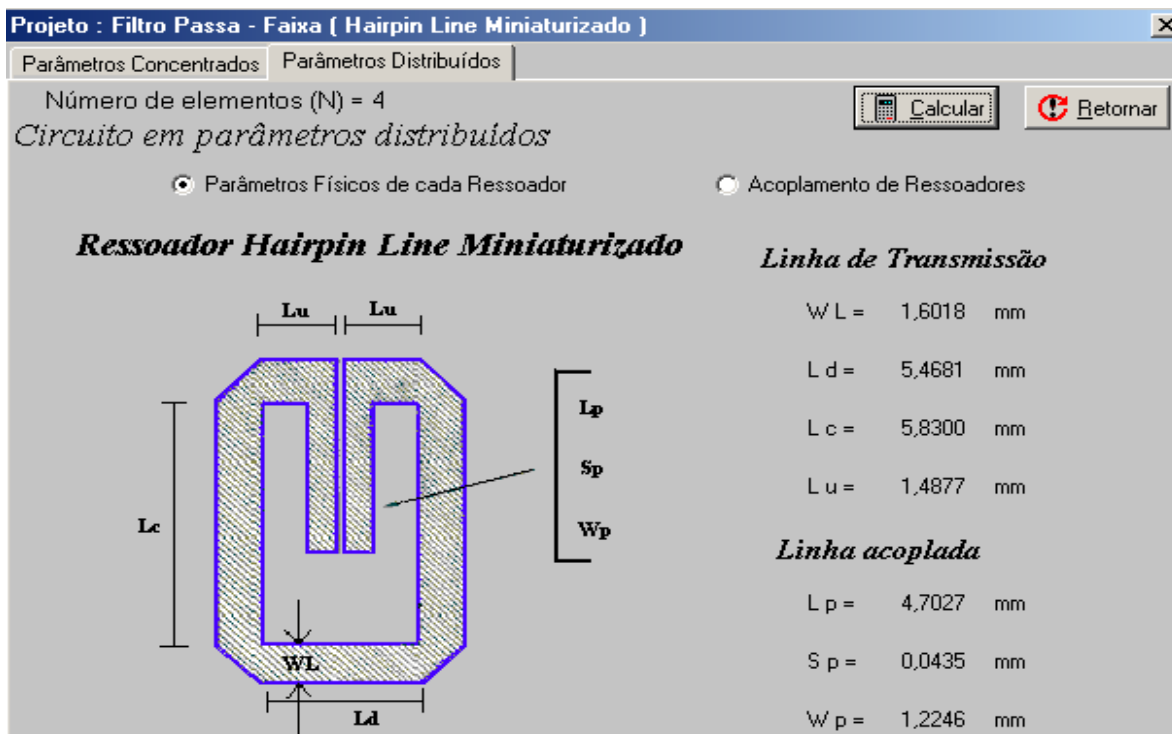
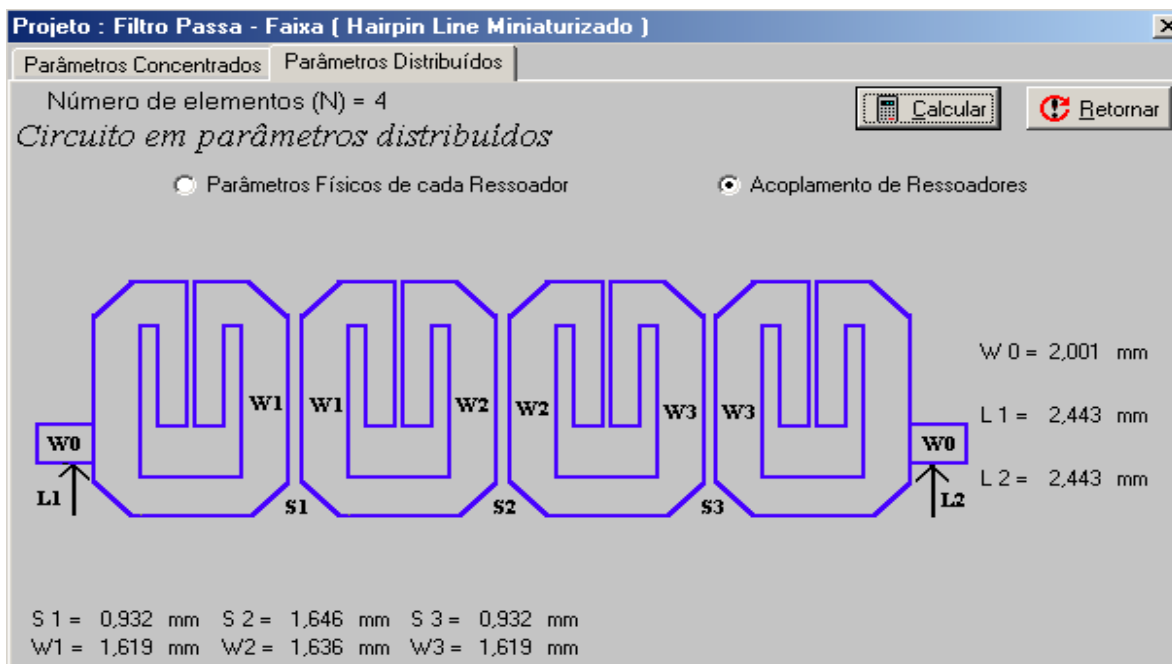


FIG.14 – Dimensões do ressoador e do acoplamento de 4 ressoadores.

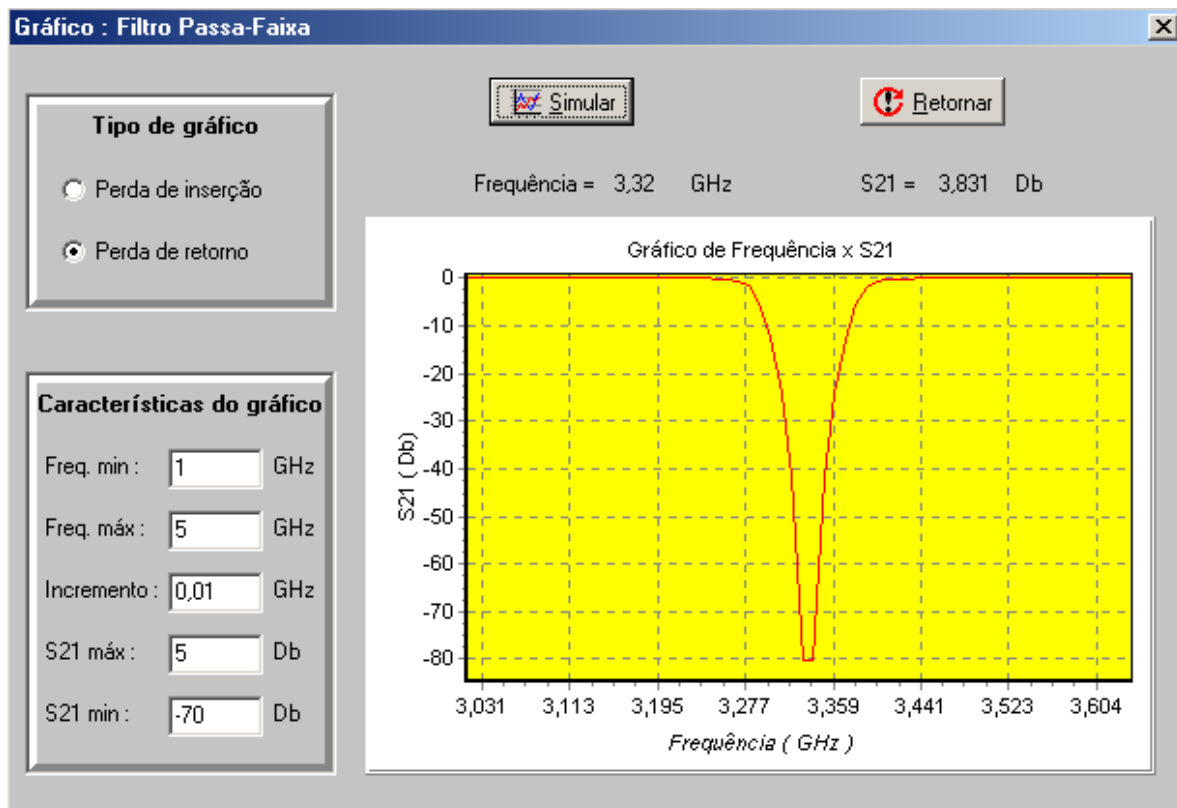
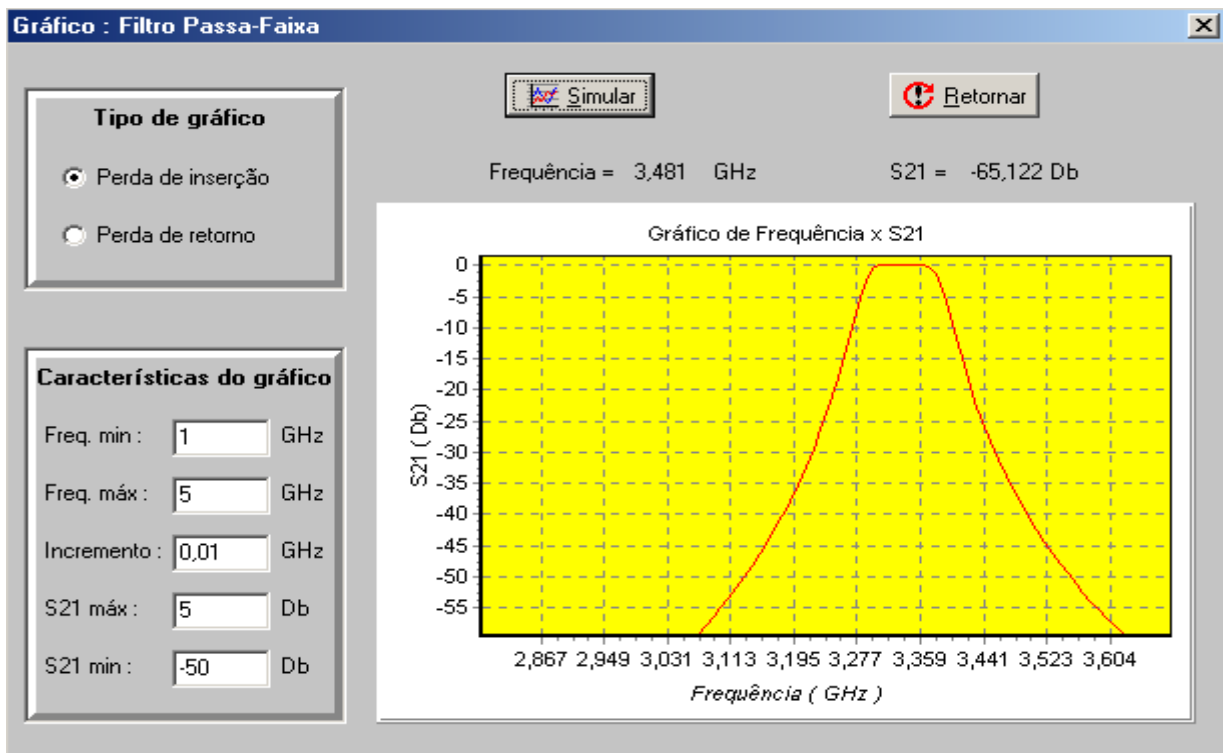


FIG.15- Resposta em frequência do filtro F1.

As características da microstrip são:

$$\begin{aligned}\epsilon_r &= 2.2 \\ b &= 0.635 \text{ mm} \\ t &= 0.035 \text{ mm} \\ Z_0 &= 50 \Omega\end{aligned}$$

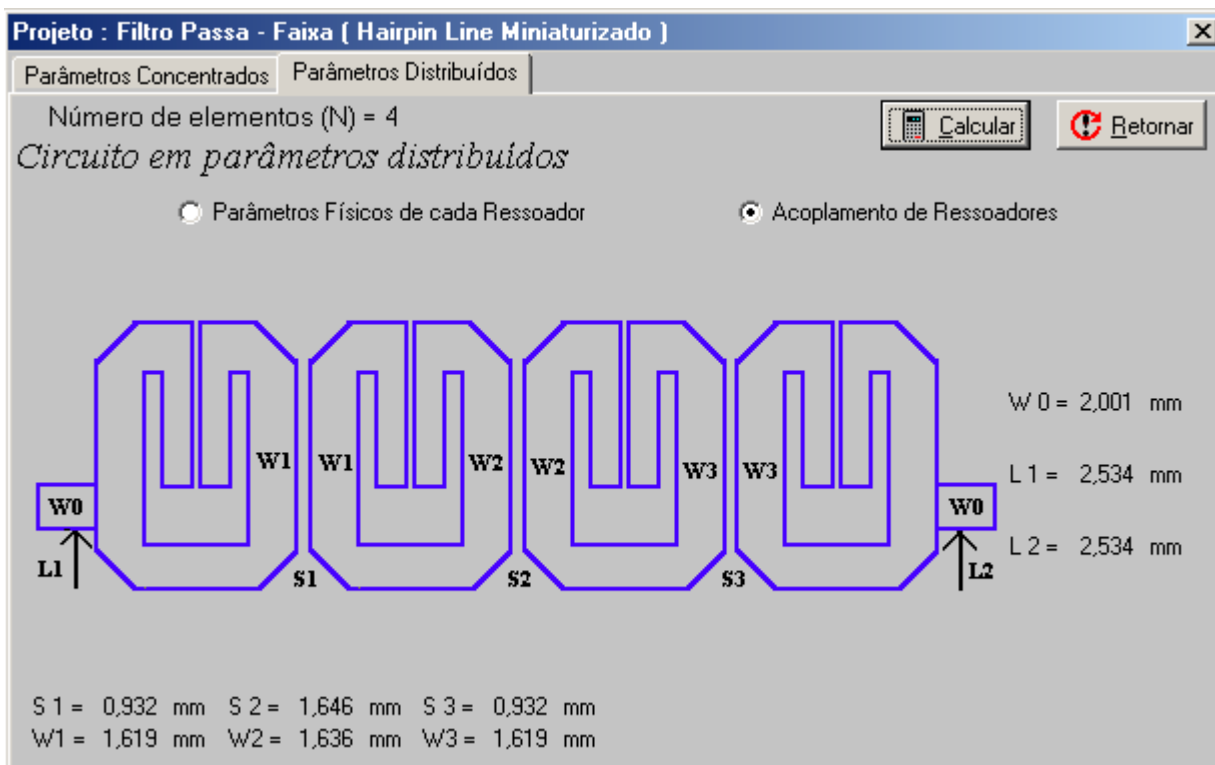
Utilizando-se a mesma microstrip, fez-se o projeto do filtro 3, descrito abaixo:

- **Filtro F3:**

O filtro F3 é o que vai filtrar a banda de frequência do *uplink*, tendo a resposta Butterworth e como características:

$$\begin{aligned}F_0 &= 3,215 \text{ GHz;} \\ B &= 3\% = 96,45 \text{ MHz;} \\ L_i &\leq 1 \text{ dB;} \\ L_r &\geq 24 \text{ dB;} \\ NF &\leq 4 \text{ dB.}\end{aligned}$$

Para se projetar este filtro também foi utilizado o software Filtros, que forneceu as seguintes estrutura e resposta em frequência:



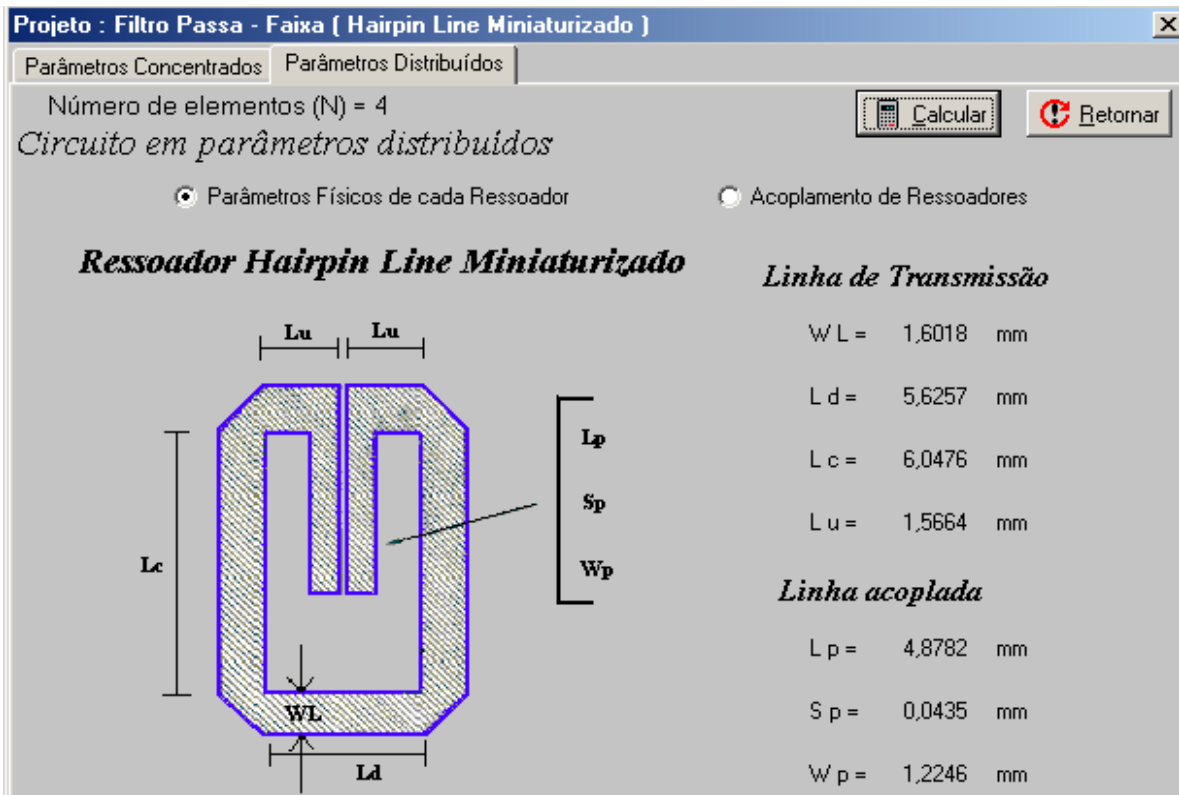
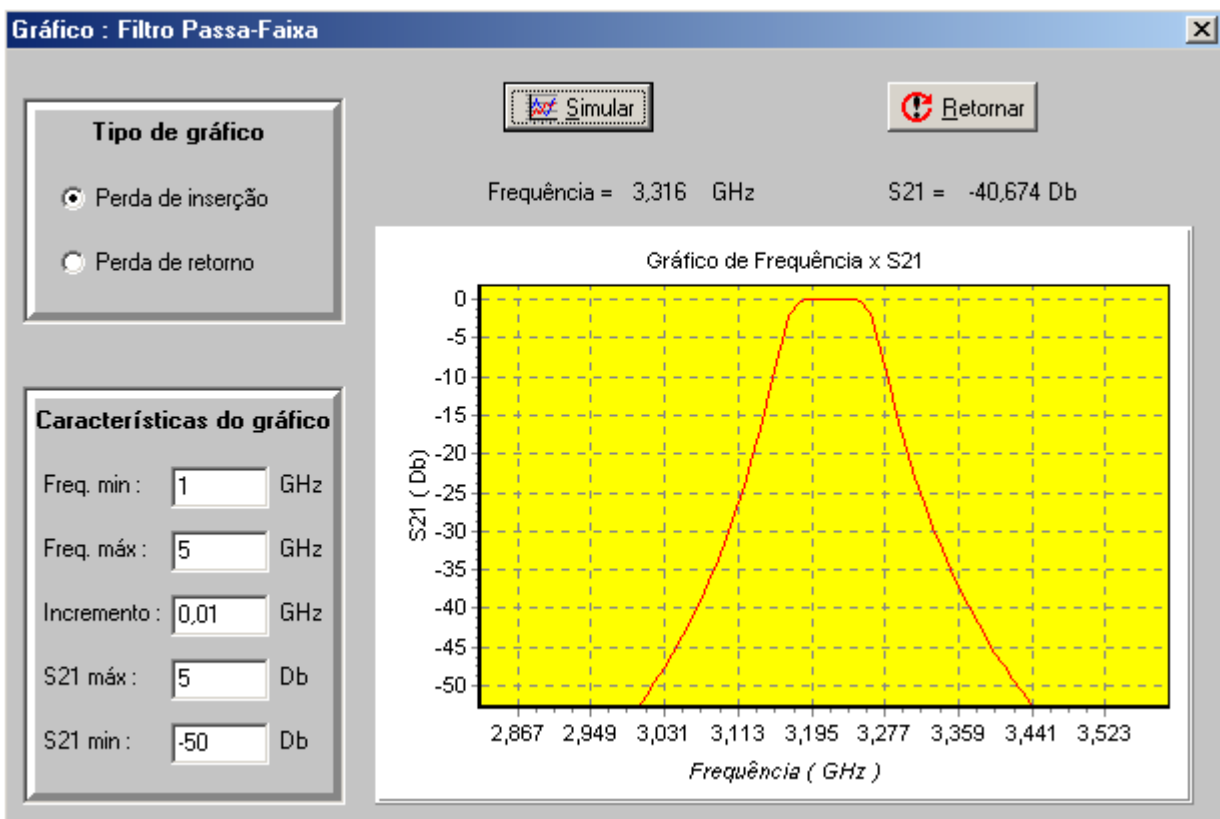


FIG.16 – Dimensões do ressoador e do acoplamento de 4 ressoadores.



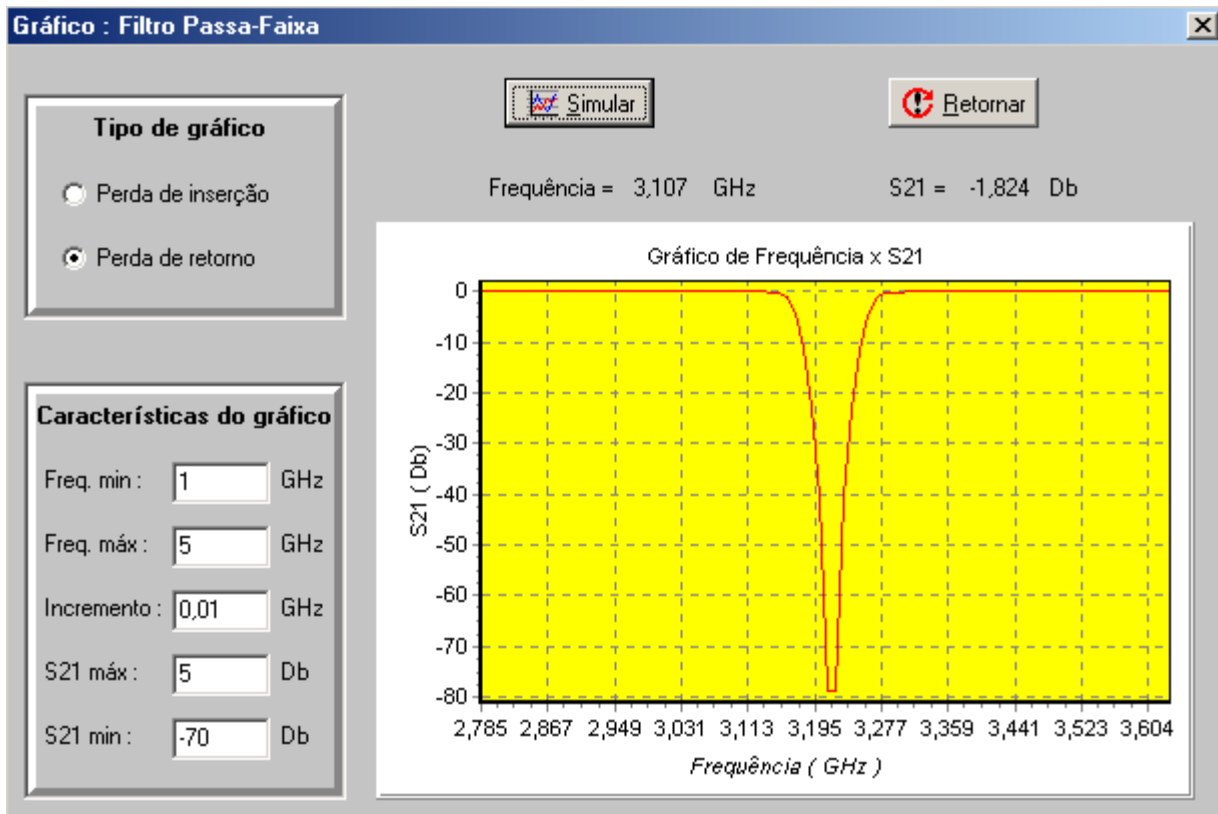


FIG.17- Resposta em frequência do filtro F3.

Os filtros F1 e F3, quando implementados, deverão ser então capazes de selecionar somente as bandas de *downlink* e *uplink*, respectivamente.

4.2.4- AMPLIFICADORES DE MICROONDAS:

Os amplificadores de microondas são dispositivos ativos que, conforme seu nome indica, amplificam o sinal injetado em uma de suas portas, através do ganho introduzido por um ou mais transistores [3]. O amplificador de microondas ideal teria que ter um ganho constante e apresentar casamento na porta de entrada para uma banda de frequência prevista para seu funcionamento. O casamento de amplificadores de microondas que operem em uma banda larga é difícil porque, tipicamente, os transistores de microondas não apresentam bom casamento em 50Ω . Um outro fator que dificulta a construção de um amplificador de banda larga é que o parâmetro espalhamento S21, ou seja, a potência transferida da porta 1 para a porta 2, ou em outras palavras, o ganho que o amplificador

confere ao sinal inserido na porta 1, diminui com a frequência numa taxa de 6dB por oitava de frequência. Devido a estes fatores, o *design* de amplificadores de microondas de banda larga apresentam uma certa dificuldade.

No presente projeto foi pesquisado um transistor de microondas que ofereça ganho na região de 3 GHz, para poder ser utilizado no amplificador do *front-end* inicial proposto na figura 13. Um transistor que oferece as características buscadas é o FET descrito abaixo [17]:

Transistor: FET

Especificação: Motorola 2N6618A

Com o seguinte arquivo .s2p, que especifica seus parâmetros espalhamento em diferentes frequências:

! TRANSISTOR TYPE: fet

! MANUFACTURER: MOTOROLA

MODEL: 2N6618A

! BIAS CONDITIONS: VCE=10 IC=3 HFE=

! COMMENTS:

GHZ S M A R 50

F	S11		S12		S21		S22	
1	0.70	-120	5.12	101	0.04	3 0	0.74	-28
1.5	0.64	-143	3.60	85	0.05	27	0.70	-34
2	0.64	-161	2.82	71	0.05	24	0.67	-37
2.5	0.62	-174	2.30	56	0.05	23	0.69	-52
3	0.62	175	1.90	44	0.06	28	0.70	-56
3.5	0.61	165	1.66	34	0.06	35	0.73	-68
4	0.61	157	1.46	24	0.06	40	0.78	-70
5	0.62	142	1.18	8	0.08	39	0.76	-82
6	0.60	127	0.98	-9	0.09	38	0.78	-95

A análise deste transistor foi feita através do software Mr. Smith, desenvolvido como projeto final pelo aluno Ildeu R. Borges Júnior. Na análise do funcionamento deste transistor em um range de frequências, obtivemos o seguinte resultado para o ganho:

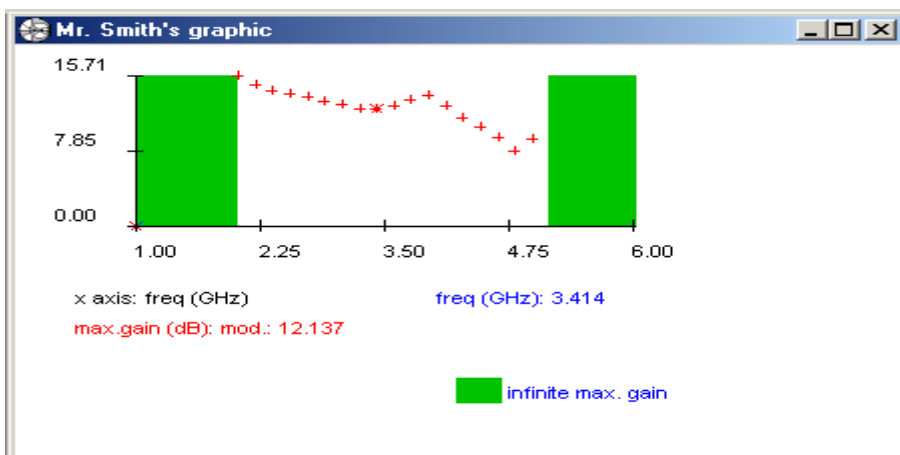


FIG.18 – Ganho máximo obtido em um range de frequências de 1 a 6 GHz.

Observa-se que, se o transistor estiver casado, este apresenta um ganho de, aproximadamente, 12 dB na faixa de frequência que se quer operar no *front-end* SDR inicial, que é em torno de 3,1 GHz a 3,5 GHz. A seguir, tem-se as impedâncias de casamento neste intervalo de frequências:

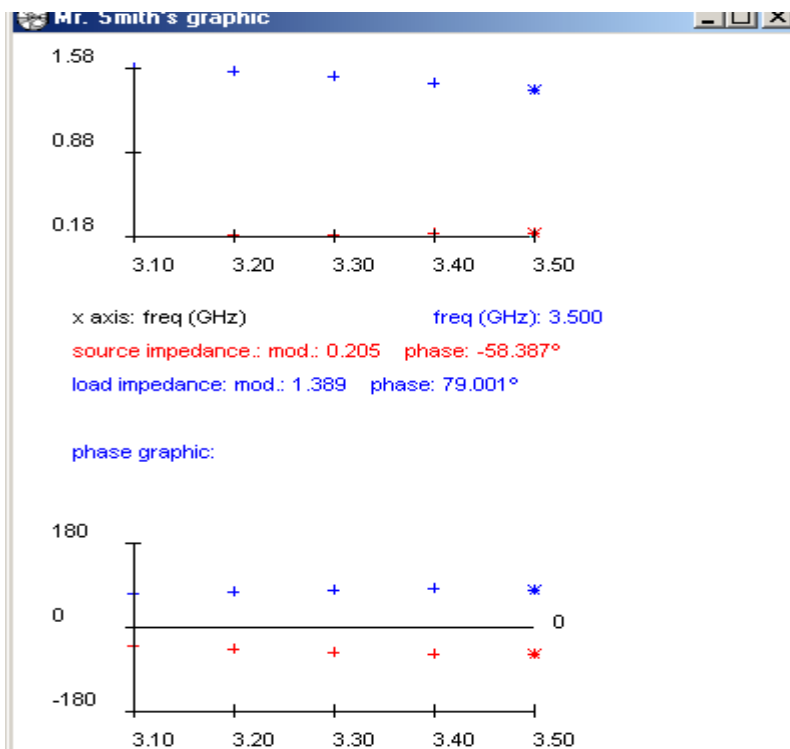


FIG.19 – Impedâncias de casamento da fonte e da carga de 3,1 a 3,5 GHz.

Estas impedâncias de casamento estão relacionadas, de acordo com a frequência em análise, na tabela 02 abaixo:

Tabela 02: Impedâncias de casamento de fonte e de carga

Frequência a GHz	Impedância		Impedância	
	módulo	fase (°)	módulo	fase (°)
3.1	0.178	-42.326	1.583	71.357
3.2	0.182	-49.045	1.549	75.055
3.3	0.187	-54.542	1.5	77.915
3.4	0.195	-57.709	1.444	79.251
3.5	0.205	-58.387	1.389	79.001

Observa-se, pela carta de Smith, que este amplificador terá um comportamento estável na frequência desejada, tendo em vista que se encontra fora dos círculos de instabilidade, como mostrado nas figuras abaixo:

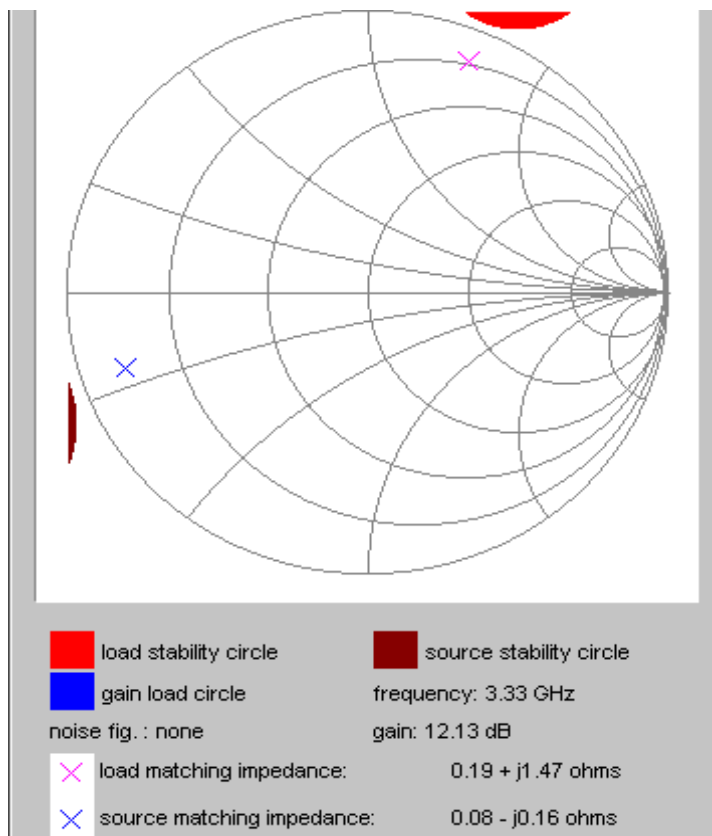


FIG.20- Região de estabilidade do amplificador na frequência de 3,33 GHz.

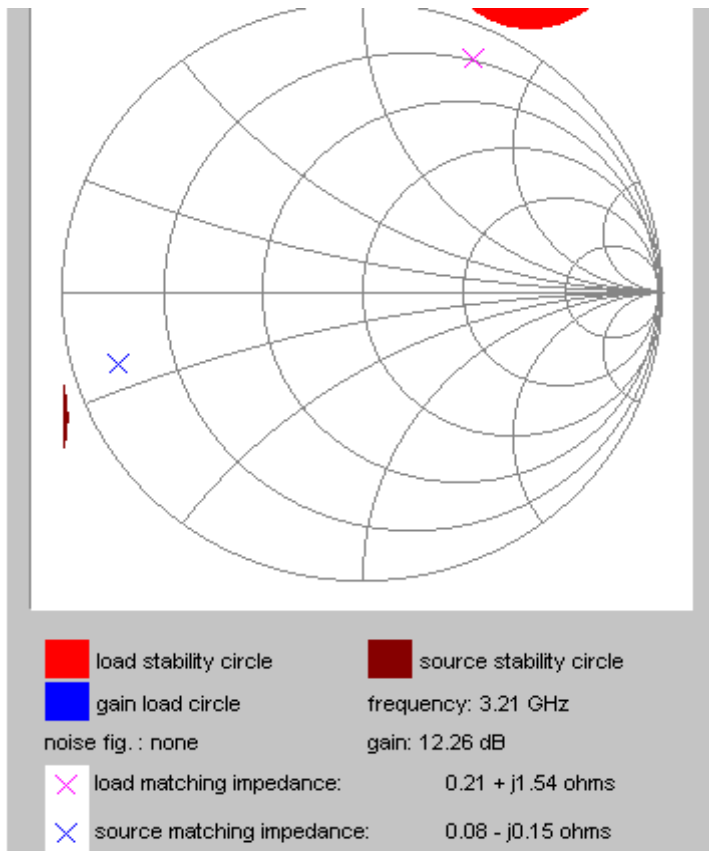


FIG.20- Região de estabilidade do amplificador na frequência de 3,21 GHz.

O transistor em utilização, apresenta a seguinte matriz de espalhamento nas frequências de 3,33 GHz e 3,21 GHz, respectivamente:

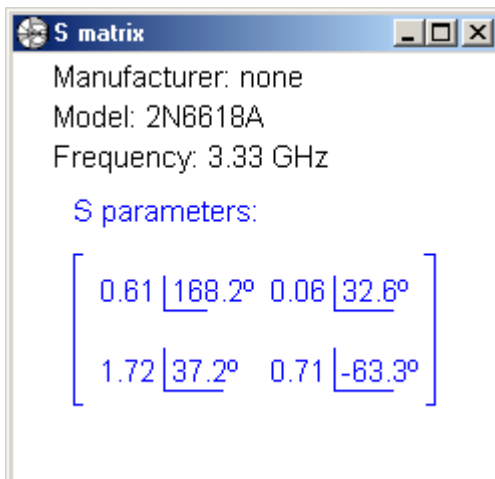


FIG.21 – Matriz de espalhamento do transistor na frequência de 3,33 GHz.

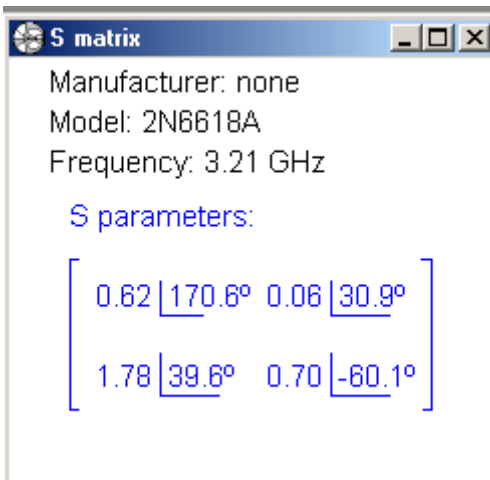


FIG.22 – Matriz de espalhamento do transistor na frequência de 3,21 GHz.

A seguir são definidos os circuitos de casamento para o transistor, realizado com estubes em uma microstrip com as mesmas características da utilizada para o projeto dos filtros:

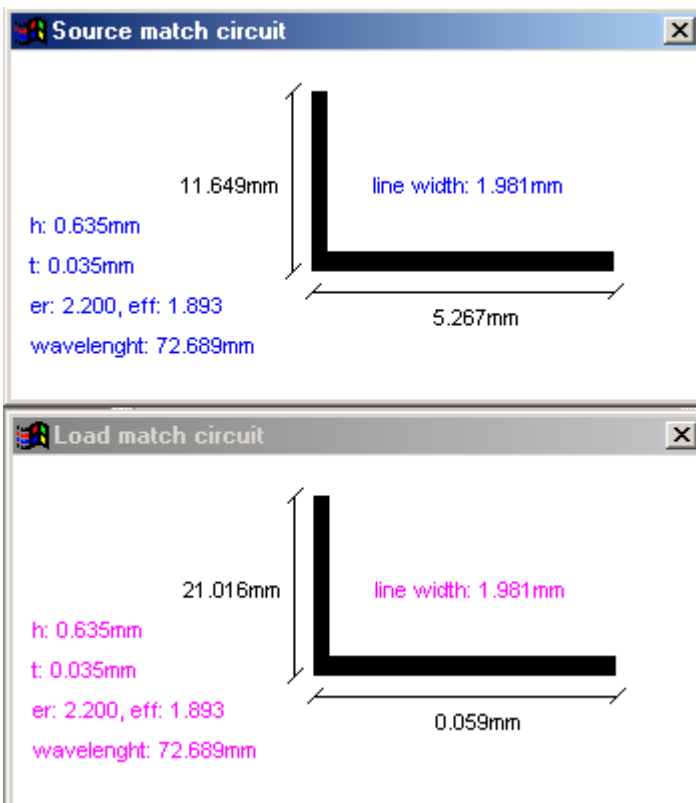


FIG.23 – Circuitos de casamento do gerador e da carga.

Neste item, foi possível definir um modelo de transistor para a construção de um amplificador de microondas que satisfaça aos requerimentos para o *front-end* SDR proposto. Este amplificador, no entanto, não foi construído. No LEMOM existem dois amplificadores de microondas que atendem aos requerimentos do amplificador do *front-end* SDR proposto. Tais amplificadores foram caracterizados, como descrito a seguir:

Por caracterização do amplificador de RF entende-se a caracterização da banda de funcionamento, do ganho e da intermodulação. O procedimento inicial foi o de injetar um sinal de teste neste, com potência de -37 dBm e varrer as frequências de 2,679 GHz a 4,5 GHz e verificar o comportamento do amplificador. O sinal de teste está mostrado na figura 24:

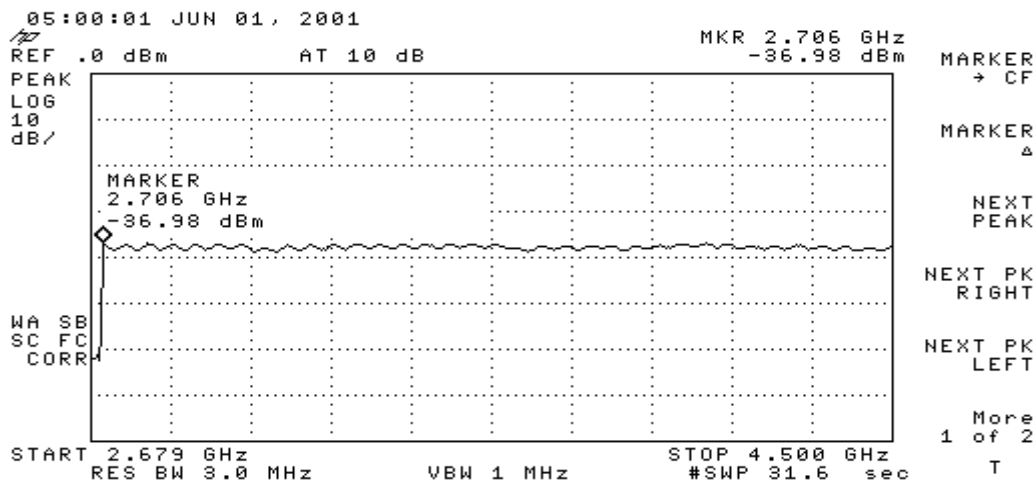


FIG.24 – Sinal de teste.

O amplificador utilizado, primeiramente, na análise foi o de especificação ZJL-6G, que funciona em 6 GHz. Este amplificador foi polarizado com 12V e 40 mA. É importante lembrar que, o modo correto de realizar este procedimento é primeiramente conectar todas as portas antes de ligar o sinal de teste. O sinal observado na saída do amplificador foi o ilustrado na figura 25:

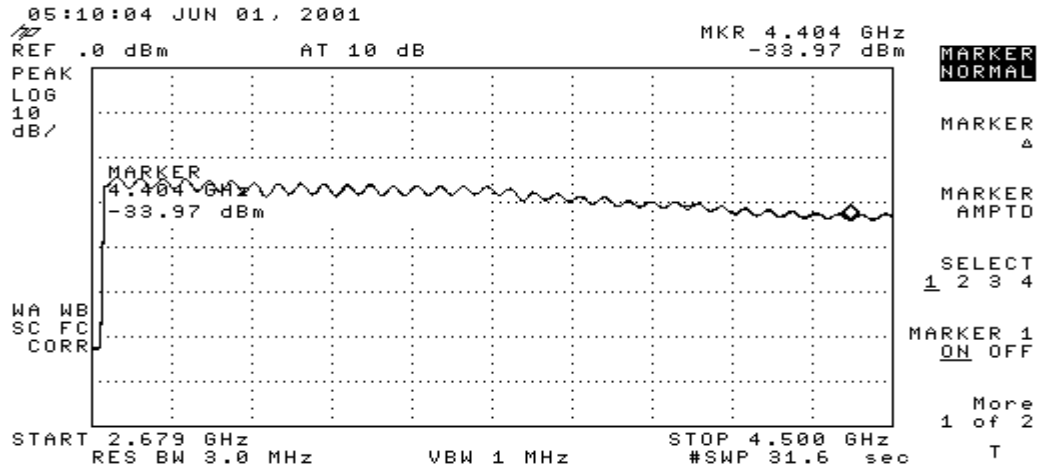


FIG.25 – Sinal na saída do amplificador.

Verificou-se, em frequências próximas de 2,679 GHz, que o sinal após o amplificador possuía potência de -24 dBm, o que caracteriza um ganho de 13 dB.

Em seguida foi feita a caracterização do amplificador ZJL-4G. O mesmo sinal de teste, com potência de -37 dBm foi injetado neste amplificador. Na tela do analisador de espectro, foi analisada a figura 26, com o sinal de teste e o sinal de saída do amplificador ZJL-6G, e a saída do amplificador ZJL-4G sobreposta a ela. Deste modo, foi possível se fazer uma comparação entre o ganho apresentado pelo amplificador ZJL-6G e o ZJL-4G, como mostrado abaixo:

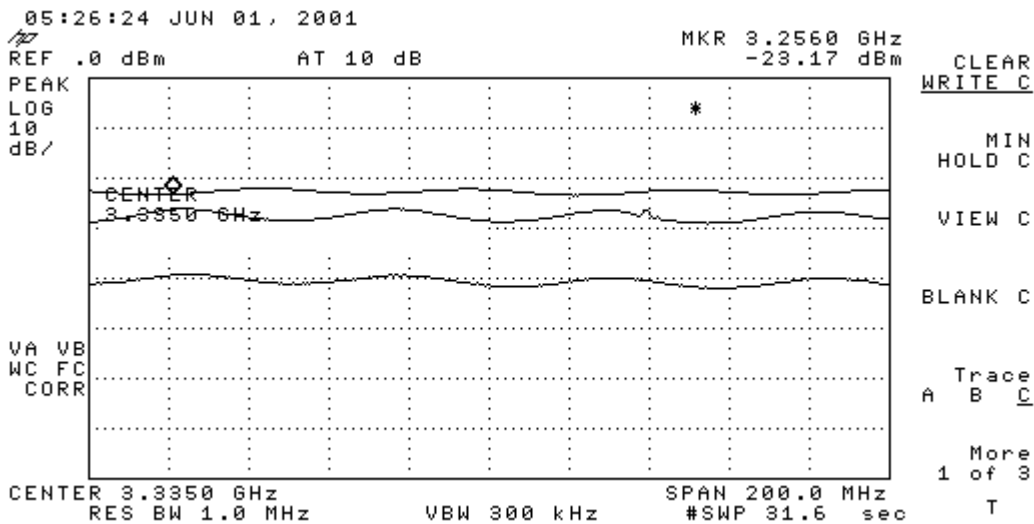


FIG.26 – Amplificação do sinal de teste pelo ZJL-4G.

Observa-se nesta figura que o amplificador ZJL-4G apresenta maior ganho que o ZJL-6G, sendo este ganho da ordem de 14 dB.

A última análise feita com os amplificadores de RF foi em relação à introdução de harmônicos. Para tal análise, foi injetado um sinal de teste nos amplificadores ZJL-6G e ZJL-4G, com um único tom cossenoidal, na frequência de 3,338 GHz e potência de -37 dBm. Este sinal de teste pode ser observado na figura 27:

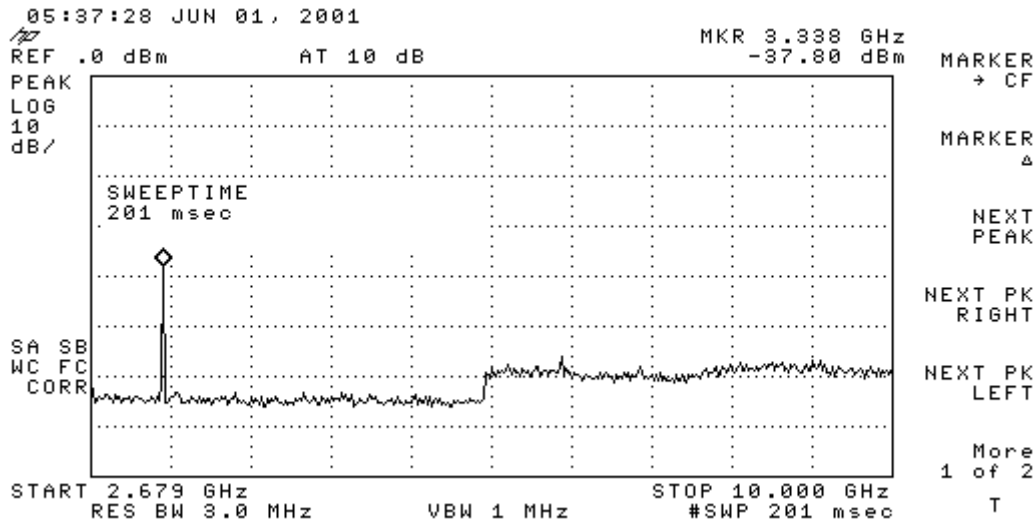


FIG.27 – Sinal de teste.

Na saída dos amplificadores ZJL-4G e ZJL-6G não foram observados harmônicos. A figura 28 ilustra a saída do amplificador ZJL-4G, com ganho de 14 dB.

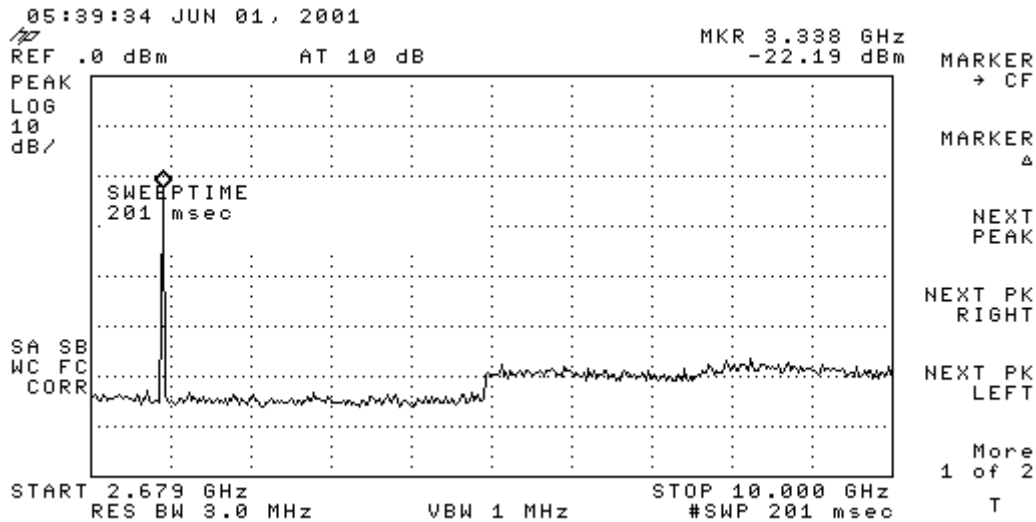


FIG.28 – Sinal de saída do amplificador ZJL-4G. Não há 2º harmônico.

Esta análise dos amplificadores existentes no LEMOM que funcionam na banda de frequência desejada para a construção do *front-end* SDR serve como base para avaliação em uma posterior montagem do amplificador proposto neste projeto.

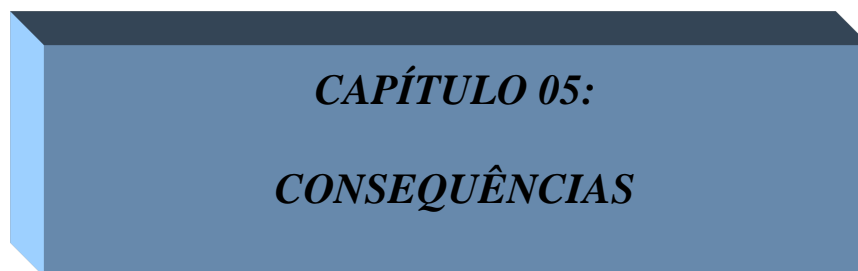
4.2.5- MISTURADORES:

Um misturador é um dispositivo que possui duas entradas e uma saída. Seu objetivo é transladar em frequência, um sinal de FI que se apresente em uma de suas entradas. A frequência para a qual este sinal será transladado (RF) é determinada pelo sinal que é gerado por um oscilador local (LO), ligado à sua outra entrada. Na saída do misturador está o sinal de RF, que é o sinal em frequência intermediária (FI) original inserido neste transladado para a frequência de RF, de acordo com a frequência do sinal gerado pelo oscilador local. Em resumo, o misturador faz a conversão em frequência de um sinal de entrada. O elemento não - linear mais utilizado para realizar tal conversão são os diodos de microondas, sendo que transistores também poderão ser utilizados como elemento não – linear.

Um misturador precisa ter suas características analisadas. Dentre estas características, as mais importantes são: A perda de conversão, determinada por $10 \log [(Pot. \text{ do sinal de FI}) / (Pot. \text{ do sinal de RF})]$; Frequências harmônicas geradas pelo dispositivo e a intermodulação.

Neste capítulo, apresentou-se uma arquitetura possível para o desenvolvimento da parte de RF do *front-end* inicial SDR, de forma que seja utilizada a frequência do enlace de microondas existente no LEMOM. Esta frequência foi escolhida porque, depois de pronto o *front-end*, será possível se testar o mesmo, que também será composto pela parte de processamento digital de sinais, com tal processamento regido por um software. Estas duas outras partes estão sendo desenvolvidas por outros alunos como projeto final.

Embora não se tenha atingido o objetivo de plena realização do *front-end*, o trabalho aqui apresentado direciona trabalhos posteriores a respeito da sua construção.



CAPÍTULO 05:
CONSEQUÊNCIAS

5.1-ASPECTOS ECONÔMICOS DO SDR:

Como dito anteriormente, os mercados consumidores mais interessados na arquitetura aberta SDR é o mercado de telefonia celular em sua evolução para sistemas móveis celulares 3G e o setor militar [7].

Em 1992, quando Mitolla introduziu o termo *Software Defined Radio* quase ninguém sabia do que se tratava. Quando em 1996 foi publicado um artigo no IEEE, todos os envolvidos no mercado de RF ficaram interessados em adquirir uma arquitetura SDR. Já em 1999 o comércio começou a duvidar da viabilidade econômica de aquisição de um SDR [13].

De fato, o SDR deve ser caracterizado por seus parâmetros críticos de aquisição. Estes parâmetros, que interferem tanto no desempenho técnico quanto no estudo de viabilidade econômica, são:

- Número de canais simultâneos suportados pela interface de RF;
- O nível de programabilidade do acesso digital;
- A flexibilidade e viabilidade do software;

O número de canais simultâneos suportados pela interface de RF pode ser apenas de um canal, que apresenta um risco mínimo de desenvolvimento e de complexidade. Pode ser

de múltiplos canais, que é o de aplicação tipicamente militar e que requer multiprocessamento distribuído. E pode haver também o acesso total, a todos os assinantes, que é típico da infra-estrutura celular, e que traz o risco de incompatibilidade entre a demanda de processamento oferecida pelo software e a capacidade de processamento do hardware.

O acesso digital programável define o quanto o SDR é reprogramável e flexível por consequência. Os graus de programabilidade variam desde onde se tem um rádio digital com função fixa e programabilidade em banda base, que é o caso dos rádios digitais até o ponto de flexibilidade máxima onde a conversão analógico- digital será feita em RF e todas as funções de rádio poderão ser definidas por um software. Os rádios digitais não são SDR porque a filtragem necessária para se ter a banda base é feita em hardware dedicado. Pode existir programabilidade em banda base, em frequência intermediária e em RF. A filtragem de um canal não precisa mais ser reduzida a um filtro desenvolvido em hardware e que seja extremamente dedicado. Hoje em dia existem filtros digitais de alta qualidade, alta programabilidade e eficientes com relação à potência. Estes filtros podem filtrar o sinal e mesmo transladá-lo para uma plataforma programável.

A flexibilidade e a viabilidade econômica de aquisição do software determina a habilidade do provedor de serviço de adquirir este módulo de software. Idealmente, os módulos de software têm de ser disponibilizados por várias empresas, como a Texas Instruments DSP Co-operative, e “rodar” em diferentes plataformas para que o provedor tenha mais flexibilidade e baixo custo.

Estas características determinam o custo do SDR. Além de se buscar o preço viável com as características desejadas, como flexibilidade e alta programabilidade, também se busca a arquitetura aberta.

5.2- IMPLICAÇÕES DO SDR NA REGULAMENTAÇÃO DE SERVIÇOS:

A nova tecnologia de rádio via software, que proporciona um funcionamento multi-banda e multi-modo tanto nos *front-ends* como na infra-estrutura, tem implicações sociais e políticas. O gerenciamento do espectro deverá ser inovado uma vez que o SDR, idealmente, irá operar em qualquer banda de RF que está na capacidade de sua plataforma. Além disso,

a certificação de equipamentos se depara com obstáculos legais uma vez que SDR introduz novos níveis de complexidade no processo de certificação de dispositivos. O FCC (Federal Communication Commission) descreve a certificação dos SDR através de perguntas de ordem reguladora [12]:

- Para quais serviços o SDR é aprovado?
- Uma nova aprovação é necessária para cada mudança na unidade SDR?
- Como o FCC assegura o cumprimento das regras de autorização de equipamentos para SDR?
- Como o uso desautorizado do SDR pode ser prevenido?

Os reguladores normalmente estabelecem o requerimento de licenças para indústrias/equipamentos/serviços utilizarem uma faixa de espectro. As licenças também são específicas em termos da potência de RF na saída, da modulação, da largura de banda ocupada, emissão de espúrios, estabilidade de frequências, etc. Os rádios analógicos possuíam estes parâmetros ligados fortemente ao hardware, atrelando o processo de certificação do serviço à certificação do equipamento. Os rádios digitais ou PDA's (Programmable Digital Access) têm seus parâmetros pouco atrelados ao hardware, mas mesmo assim são compatíveis com o processo de certificação atual. No entanto, os SDR's tem seus parâmetros definidos por software, que é muito pouco dependente do hardware. Os *downloads* pelo ar ainda complicam substancialmente o processo de certificação. O problema maior, em minha opinião, em relação às leis de regulamentação do SDR será que estas, apesar de serem necessárias, poderão vir a "engessar" a tecnologia, de forma a privar a sociedade do maior benefício do SDR: a flexibilidade. Adicionado a isto, a arquitetura aberta tende a aumentar ainda mais os desafios da regulamentação porque permite muitas combinações entre módulos de software e hardwares diferentes, e cada combinação, a princípio, deve ser analisada para ser regulamentada.

O SDR terá algum impacto fundamental no uso do espectro de rádio? Uma nova área de pesquisa, os rádios cognitivos, sugere que este será o caso.

Aplicações *wireless* de multimídia requerem largura de banda significativa, que será dada pelos serviços de 3G. Mas, embora os investimentos na infra-estrutura de 3G sejam

substanciais, o espectro de rádio destinado a este não será ilimitado. Os rádio cognitivos são uma extensão particular do SDR que oferecem um mecanismo de flexibilização do espectro de rádio utilizando uma nova classe de protocolos chamados etiquetas de rádio (radio etiquettes). Isso pode aumentar a largura de banda disponível para uso convencional. Existem grupos de frequência disponíveis para serem alocadas, se o espectro for gerenciado com a utilização do novo protocolo. O protocolo dos rádios cognitivos pode requerer que o front-end saiba o grau de prioridade dos usuários bem como que estes devolvam as frequências em utilização, num tempo de 30 milissegundos.

Os rádios cognitivos ainda vão demorar a entrar em funcionamento, mas os pontos de pesquisa são uma direção interessante para os gerenciadores de espectro. Ao invés da alocação de espectro ser rígida, o estudo dos rádios cognitivos delegará os detalhes do gerenciamento de espectro para os próprios rádios.

As existentes práticas de regulamentação do espectro, não são adequadas para suportar o SDR, fazendo com que não se tire vantagem do seus benefícios em potencial. Trabalha-se para entender e desenvolver um modelo adequado para o acesso do espectro, padrões técnicos e de operação. Por exemplo, a prática de se fazer o uso da frequência da forma “first-come, first-serve” não é aplicável a um ambiente adaptativo e com alto grau de compartilhamento e pode ser substituído com a filosofia “you all come”. Adicionado a isto, os métodos de certificação de circuitos físicos de rádio não são aplicáveis onde as mudanças na configuração do equipamento são feitas através de um download de software. Para a autoridade reguladora, o controle das funções de rádio afeta diretamente a maneira pela qual um dado dispositivo utiliza o espectro.

O SDR oferece a potencialidade de aumentar o uso eficiente do espectro e uma solução para utilizar bandas pouco usadas ou totalmente inutilizadas para acomodar mais usuários numa dada banda e aumentar o compartilhamento do espectro. A primeira geração dos SDR devem ainda obedecer às regras de utilização do espectro não se diferenciando em relação ao uso do espectro dos celulares atuais a não ser pelo fato de que a definição de frequência será dada em várias partes, cada uma para uma dada combinação de banda e padrão a ser utilizada pelo SDR.

O que é novo e diferente , mesmo na primeira geração de SDR, é o uso do software para gerar uma variedade de formas de onda dependendo da localização do usuário, da

escolha do meio e do padrão local, adicionado à possibilidade de se acrescentar ou fazer um *download* de um software novo ou de uma atualização. Os dispositivos SDR podem ser pré programados para assegurar que estes estão de acordo com a regulamentação, com os padrões e com a rede, assim como os rádios de hoje são construídos de forma a darem os resultados desejados, capazes de escolher a sua potência de transmissão para que certa qualidade de serviço seja atingida.

Como uma autoridade reguladora irá assegurar que o software presente em um SDR está correto inicialmente e não foi modificado depois sem autorização para fazê-lo? (o hardware é mais fácil de testar e inspecionar). Se a concepção inicial do SDR é permitir que o usuário faça um *download* de uma combinação de banda/padrão para permitir um *roaming* geral e/ou de um novo serviço, como o regulador (ou reguladores, se um outro país está envolvido) irá assegurar o cumprimento das regras por eles determinadas e a prevenção de uma interferência não prevista causada por este software? Estas questões terão de ser estudadas pelos organismos reguladores.

A reconfiguração do SDR será feita por um *download* de software, possivelmente utilizando uma transmissão pelo ar, emitida pelo fabricante, pelo operador ou pelo regulador. O rádio vai se adaptar ao ambiente em que se encontra, mudando as bandas de operação ou provedores de serviço conforme necessário, selecionando a forma de onda necessária para atender ao requerimento do usuário, monitorando um canal antes de transmitir de modo a evitar a interferência em outros canais e até mesmo aumentando a potência de transmissão para assegurar esta em uma situação de emergência. Com o software apropriado, o SDR pode transmitir em qualquer lugar, a qualquer tempo e em qualquer frequência, em qualquer modo ou modulação desejada, que fornece uma grande capacidade de comunicação tanto para os civis quanto para os militares. SDR tornará possível a oferta de novos serviços, como por exemplo, a telefonia 3G, de um modo mais efetivo, econômico e flexível. Adicionado a isto, o SDR deverá ser capaz de automaticamente controlar o compartilhamento de espectro e sua eficiência, evitando interferência em outros usuários.

Neste cenário, o SDR irá se diferenciar bastante das regras e políticas existentes hoje em dia, requerendo mudanças da filosofia e da prática de controle de espectro. Os primeiros SDR deverão obedecer um procedimento de autorização que irá verificar a

performance da configuração original do hardware e software. As atualizações feitas a partir de *downloads* deverão requerer uma aceitação mais flexível do software e um cuidadoso gerenciamento da nova configuração, feito pelo fabricante, usuário ou outro responsável. Sendo o SDR capaz de gerir sozinho seu uso do espectro, então o papel dos reguladores será, a longo prazo, o de publicar uma pequena lista de bandas de frequências proibidas para proteger serviços necessários e pré- estabelecidos há muito tempo, como a frequência de comunicação da polícia ou dos bombeiros.

5.3- PRÁTICAS E MODELOS DE GERENCIAMENTO DO ESPECTRO:

Ao longo dos anos, a autoridade de regulamentação do espectro tem desenvolvido vários modelos para gerir o espectro de radio e seus diversos usuários, levando em consideração vários fatores como por exemplo o estado da tecnologia, a importância (por exemplo, serviços que tratam da segurança de vida), qualidade de serviço, e considerações de compartilhamento. Dentre os modelos, três são importantes para discussão [12]:

- Regras rígidas: Implica bandas altamente restritas com regras técnicas e de operação detalhadas, com um controle de uso muito rígido, sem espaço para flexibilidade (por exemplo, bandas destinadas à aviação/marinha, radio navegação e difusão). A maior desvantagem deste modelo é que alguns canais são muito pouco usados ou inutilizados;
- Compartilhamento flexível: Promove o compartilhamento como objetivo principal. Tem muitos usuários por canal e regula basicamente detalhes técnicos como potência de transmissão, canais utilizados e tipo de modulação, mas deixa a operação principalmente para os sistemas licenciados.
- Sem restrições: Implica um número mínimo de regras como potência, limite de campo de atuação e restrições de banda. Tem relativamente uma flexibilidade ilimitada para aplicação e área de uso. Existem milhões de usuários por canal de operação. Por exemplo, telefones sem fio, controles remoto de portas de garagem e outros dispositivos presentes no FCC parte 15.

No início das operações de rádio, a gerência era rígida para estabelecer a ordem ao invés do caos e assegurar um desenvolvimento ordenado dos sistemas de rádio. Até mesmo hoje, algumas aplicações de rádio ainda necessitam de um alto nível de especificidade e estrutura, como a difusão pelo ar, a aviação, a marinha e os serviços de segurança de vida, como bombeiros e polícia. Com o avanço da tecnologia, mais usuários tiveram de ser acomodados. Modelos mais avançados, como os utilizados nas redes de celulares, foram implementados.

Para regular o uso do espectro de rádio por todos os serviços existentes sem que estes se interfiram entre si, é necessário se definir os parâmetros de RF como a banda de frequência, a largura de banda, a potência, modulação, método de acesso, características da antena e eficiência de espectro para que os requerimentos do serviço de rádio a ser oferecido como cobertura, velocidade de transmissão de dados, número de usuários simultâneos, prioridade de acesso, QoS, entre outros, sejam atendidos. Com a evolução da tecnologia da frequência e largura de banda fixas dos sistemas analógicos para as técnicas digitais de hoje em dia, a gerência de espectro mudou da filosofia de regras rígidas para uma filosofia de compartilhamento mais flexível. Deste modo, pode haver a variação e a inovação dos parâmetros de RF para melhor acomodar as necessidades dos usuários, os objetivos dos serviços oferecidos e as condições de mercado. Neste ambiente se visualiza o desafio do SDR: Ser uma tecnologia que permite a otimização e a gerência dinâmica do espectro em tempo real para suportar uma diversidade espontânea nos serviços prestados aos usuários.

Tradicionalmente, o acesso ao espectro requer uma classificação do tipo de serviço (fixo, móvel, governamental ou não, marítimo...), uma alocação reservando uma determinada frequência ou canais para um determinado grupo de usuários, uma autorização para a operação de transmissão, na forma de uma licença que especifica os canais liberados para o uso. Como o conceito de SDR prevê que este terá processadores capazes de fazer decisões dinâmicas e confiáveis quanto ao acesso ao espectro, utilizando-se da análise deste para que sua transmissão seja feita com uma forma de onda e uma potência de transmissão tais que não interfiram nos outros usuários presentes, o SDR não precisaria ser restrito ao uso de uma frequência fixa. O SDR, dada sua capacidade de lidar com vários padrões,

formas de onda, configurações e protocolos, poderia acessar por exemplo uma frequência destinada ao uso militar que esteja sendo temporariamente inutilizada.

Até os dias de hoje, a certificação e a aprovação de equipamentos era realizada através do teste do dispositivo transmissor de rádio para verificar se este estava de acordo com as regras estabelecidas para determinados fins, serviços e bandas de operação. Este dispositivo, atualmente, é basicamente composto por hardware e por um firmware não reprogramável. A incorporação de um software com a possibilidade de atualizações e *downloads* torna a regulação de serviços e o processo de aprovação deste drasticamente diferente. Com a introdução desta nova tecnologia, os reguladores deverão levar em consideração que será necessário uma combinação de hardware, firmware e software para a operação do rádio e que o software será o responsável por controlar e realizar as funções deste. Desta forma, a certificação e os procedimentos de aprovação do equipamento de SDR deverão ser desenvolvidas em conjunto com as arquiteturas e os protocolos deste, provavelmente pelos fabricantes dos equipamentos de SDR, sendo estes os capazes de entender por completo esta tecnologia.

O FCC (Federal Communication Commission) em março de 2000 elaborou uma lista de perguntas acerca da tecnologia SDR para definir quais são as mudanças nas regras pré-existentes de regulação necessárias para acomodá-la. A equipe do FCC deixou claro sua confiança nos benefícios que esta tecnologia poderá trazer assim como seu potencial para aumentar a eficiência de utilização do espectro e superar incompatibilidades existentes hoje em dia entre sistemas. O FCC procurou realizar comentários acerca de questões de interoperabilidade, de eficiência de espectro, processos de autorização de equipamentos e estado da tecnologia. As questões abaixo ilustram as áreas de interesse do FCC citadas acima:

- Quais são os usos comerciais do SDR e quais são as características de rádio a serem controladas via software?
- O SDR é capaz de aumentar a interoperabilidade entre equipamentos e sistemas utilizando diferentes padrões de transmissão?
- Quanto o SDR pode melhorar a eficiência da utilização do espectro e o compartilhamento deste e como o SDR faria esta tarefa?

- O FCC seria responsável pela aprovação do hardware de radio, do software ou de ambos? Como o SDR pode ser testado para garantir que está de acordo com as normas?

As regras definidas e a gerência do espectro para o SDR será uma combinação de evolução e de revolução do que se conhece hoje como regulação. A primeira geração de equipamentos de SDR deverá obedecer às regras e aos requerimentos técnicos impostos individualmente para cada combinação de serviço prestado/ banda utilizada que este estiver usando, não importando se as funções são definidas e executadas por hardware, firmware ou software. Ele pode operar em qualquer modelo de regulação existente sem que isto signifique que esteja havendo uma substancial perda de sua performance ou que este esteja sendo ineficiente. A experiência ganha com a primeira geração de SDR, no entanto, irá fornecer uma direção na qual as regras de regulação devem evoluir de forma a se poder tirar o máximo benefício que a tecnologia é capaz de oferecer. Portanto, no início de desenvolvimento do SDR não será necessária nenhuma nova alocação imediata de frequência nem definições de serviços e categorias, nem regras técnicas, já que o SDR irá operar como um transmissor comum. No entanto, a área de certificação e aprovação de equipamentos demandará um procedimento novo ou modificado particularmente para componentes de software.

Os equipamentos avançados de SDR deverão ter um mínimo de regras operacionais e técnicas para permitir uma máxima flexibilidade e implementação de seus potenciais benefícios. O SDR deverá requerer uma família de regras definidas banda por banda, particularmente no começo, mas com uma visão de ir se diminuindo estas regras com o ganho de experiência e de confiança no sistema. O maior desafio envolverá, provavelmente, as regras necessárias para otimizar os benefícios de um uso eficiente do espectro e um melhor compartilhamento.

A visão militar do SDR está focada nos requerimentos de informação e comunicação em dez anos ou mais no futuro, enquanto que o setor privado está focando questões a curto e médio prazo de sistemas comerciais como unidades capazes de operar em multi-banda e multi-padrão para juntar sistemas celulares de primeira e segunda gerações e implementar a tecnologia de terceira geração, quando o mercado estiver pronto.

O SDR deverá ser a tecnologia que tornará possível a exploração das vantagens oferecidas por um modelo aberto de acesso ao espectro, onde o espectro é visto como um direito público, sem um dono específico de bandas ou canais.

CONCLUSÃO

O termo “Software Defined Radio” foi utilizado pela primeira em 1992 por Joseph Mitola. Este define uma arquitetura de rádio parametrizada via software, o que propicia uma base flexível, que pode ser utilizada em diversos ambientes de rádio e para realizar diversos serviços de telecomunicações.

O SDR é a evolução dos rádios digitais, porque além de ser programável como estes últimos, podem ser reconfigurados dinamicamente. Porém, esta evolução só será possível com o desenvolvimento de alguns dispositivos que constituem sua arquitetura, como por exemplo: conversores analógicos-digitais de banda larga e com alta resolução em bits; antenas inteligentes de banda larga; FPGAs totalmente reprogramáveis, entre outros.

Quando desenvolvido, o SDR será uma solução pragmática para a demanda por flexibilidade, interoperabilidade e banda larga dos sistemas celulares de 3G. A interoperabilidade deste sistema se deve à definição via software de seus parâmetros, o que o torna capaz de operar em qualquer padrão existente, pois não tem suas funções de rádio atreladas ao hardware. Além do mercado de telefonia celular, o setor militar também tem muito interesse no desenvolvimento deste sistema. Na verdade, os militares já criaram o SPEAKEASY, um rádio com características parecidas às do SDR, porém com flexibilidade e banda de operação limitadas.

O desenvolvimento do SDR requer um esforço interdisciplinar, envolvendo as áreas de desenvolvimento de software; processamento digital de sinais e RF. Para se alcançar tal desenvolvimento, é necessário todas as áreas supracitadas trabalhem harmoniosamente.

Além dos benefícios comerciais decorridos do desenvolvimento do SDR, também haverá mudanças no setor de regulação e gerenciamento do espectro de frequências. A regulação do uso deste espectro deverá se adaptar ao fato de que as funções do SDR poderão ser mudadas a qualquer tempo, via um download de software, não estando mais dependentes do dispositivo físico. Adicionado a isto, prevê-se que o SDR será capaz de se auto-gerir quanto à utilização do espectro eletromagnético, propiciando uma maior eficiência do seu uso.

O impacto causado em áreas como regulação, interoperabilidade dos sistemas, oferecimento de novos serviços, entre outros, pode ser assustador para algumas pessoas e até mesmo parecer impossível. No entanto, basta olhar para trás para ver que somos testemunhas de evoluções tão grandes quanto esta, que melhoraram muito a nossa vida. O caso mais simples e clássico é a evolução dos computadores desde o estágio em que havia os operadores de um mainframe, onde os programas eram feitos com cartões e demoravam um dia para serem compilados pelo operador até os dias de hoje, em que esses operadores desapareceram e os próprios usuários fazem seus programas no seu computador pessoal, sem falar no benefício enorme trazido pela utilização do Protocolo de Internet (IP) que tornou possível uma comunicação global entre os computadores. Do mesmo modo, a evolução dos SDR com uma arquitetura aberta irá permitir o acesso multi-banda, multi-modo e multi-serviços. Esta evolução irá ocorrer porque as aplicações *wireless* são de grande importância para os indivíduos e para a economia em geral e porque há um grande interesse de todas as partes (usuários e fabricantes) para se desenvolver uma interoperabilidade global no futuro.

BIBLIOGRAFIA

□ Livros:

- [1] Rappaport, Theodore S., *Wireless Communications*, Prentice Hall, 1996.
- [2] Lee, William C. Y., *Mobile Communications Engineering*, McGraw-Hill, 2nd Edition
- [3] Pozar, David M., *Microwave Engineering*, John Wiley & Sons, 2nd Edition.
- [4] Mitola, Joseph, *Software Radio Architecture*, John Wiley & Sons, 2000.
- [5] Abdalla, Humberto, *Fundamentos de Sistemas de Microondas (Apostila da série Microondas, desenvolvida no LEMOM)*, setembro de 1996.

□ Papers – IEEE Communications Magazine:

- [6] Cummings, Mark e Haruyama, Shinichiro, *FPGA in the Software Radio*, 1999.
- [7] Wolmarans, E. M. e Truter, A.J, *Software Radio: Implementation Aspects*, 2000.
- [8] Jondral, F., Wiesler, A. e Machauer, R., *A Software Defined Radio structure for 2nd and 3rd generation mobile communication standards*, 2000.
- [9] Srikanteswara, S., Hosemann, M., Reed, J. H., Athanas, P. M., *Design and implementation of a completely reconfigurable Soft Radio*, 2000.

- [10] Drew, Nigel J. e Dillinger, Markus M., *Evolution toward reconfigurable user equipment*, 2001.
- [11] Buracchini, Enrico, *The Software Radio concept*, 2000.
- [12] Cowen-Hirsch, Rebecca, Shrum, Dick, Davis, Brian, Stewart, Dennis, Konston, Kalle, *Software Radio: Evolution or revolution in spectrum management*, 2000.
- [13] Mitola, L., *Technical challenges in the globalization of Software Radio*, 1999.
- [14] Cheng Chen, Kwang, Prasad, R. e Poor, H.V., *Software Defined Radio*, 1999.
- [15] Ogoose, S., *Application of Software radio to the third generation mobile telecommunications*, 1999.

□ Pesquisas na internet.Sites:

- [16] www.agilent.com
- [17] www.motorola.com
- [18] www.rf-design.com.br
- [19] www.sdrforum.org.com
- [20] www.mwee.com
- [21] www.mwjournal.com
- [22] www.techonline.com
- [23] www.rfglobalnet.com