

ANALISADOR DE ESPECTRO PARA EQUIPAR LABORATÓRIOS DE TELECOMUNICAÇÕES A BAIXO CUSTO UTILIZANDO RÁDIO DEFINIDO POR SOFTWARE - TRANSMISSOR WBFM ESTÉREO PRÁTICO

Priscila Crisfir A. Diniz, Paulo Victor R. Ferreira, Gustavo N. Rocha, Antônio C. P. Veiga
Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Uberlândia – MG
priscilacrisfir@gmail.com, paulovrf@hotmail.com, nozella@gmail.com, acpveiga@ufu.br

Resumo - Este artigo tem como objetivo apresentar uma alternativa para equipar laboratórios de telecomunicações em instituições de ensino com eficiência e baixo custo, sendo assim discutiremos sobre o módulo *hardware Universal Software Radio Peripheral (USRP)* e o *software open source GNU Radio*, além de demonstrar um exemplo de aplicação desenvolvendo e implementando um transmissor FM faixa larga - Wideband Frequency Modulation (WBFM).

Palavras-Chave - RDS, GNU Radio, USRP, Transmissor FM.

SPECTRUM ANALYZER TO EQUIP TELECOMMUNICATIONS LABORATORIES WITH LOW-COST USING SOFTWARE DEFINED RADIO – A PRATICAL STEREO WBFM TRANSMITTER

Abstract - This article aims to demonstrate an efficient and low-cost alternative for telecommunications educational institutions to equip their laboratories. An approach over the hardware module Universal Software Radio Peripheral (USRP) and the open source software module GNU Radio is made. Finally is shown a practical example of an application where a stereo Wideband Frequency Modulation (WBFM) transmitter is developed.

Keywords—SDR, GNU Radio, USRP, FM Transmitter.

NOMENCLATURA

RDS	Rádio Definido por Software.
USRP	<i>Universal Software Radio Peripheral</i> .
WBFM	<i>Wideband Frequency Modulation</i> .
GRC	GNU Radio Companion

I. INTRODUÇÃO

Novas tecnologias direcionam funções, tarefas e mídias para o mundo 100% digital, ou seja, fazem com que sofram uma mudança de natureza passando a ser virtuais, existindo somente entre bits, memórias e telas de exibição. Os sistemas de comunicações também começam a ser implementados de forma virtual, utilizando um único hardware para interface com

o mundo real e um software que permite desenvolver diversos componentes de um sistema de comunicação de modo virtual.

Essa convergência nas telecomunicações permite que as complexas configurações de hardware possam ser implementadas via software de maneira mais rápida, fácil, amigável e com baixo custo, utilizando um único módulo de hardware.

Um dos indicativos que confirmam essa tendência de convergência é o notável crescimento das pesquisas na tecnologia de Rádio definido por software (RDS) que é uma inovação que surgiu para beneficiar diversos tipos de comunicações principalmente as comunicações sem fio. Um RDS pode ser genericamente definido como um rádio que usa técnicas de software em sinais de rádio digitalizados. A intenção é substituir a implementação do rádio focada em hardware pelo uso do software e consequentemente, desempenhar as tarefas de rádio numa plataforma computacional. A Figura 1 demonstra a segmentação da tecnologia RDS, entre hardware e software.

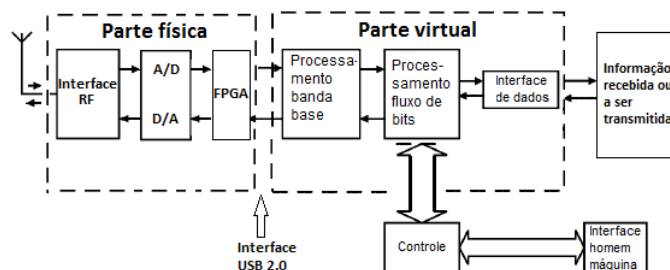


Fig. 1. Segmentação RDS, a parte física representa o hardware e a parte virtual representa o software.

A parte física da Figura 1 [1] implementada através do módulo USRP é um dispositivo desenvolvido pela empresa Ettus Research [4]. A principal função deste módulo é ser a interface entre o sistema de comunicação implementado em software e o mundo real. É através dele que o sinal processado virtualmente será gerado fisicamente para transmissão. Já para recepção o mesmo tem a função de gerar um sinal digital fiel ao sinal físico recebido.

Uma grande vantagem da utilização da tecnologia de Rádio Definido por Software está na possibilidade de permitir que todas as instituições de ensino e pesquisa, principalmente as universidades públicas, equipem seus laboratórios com módulos de hardware que implementem o conceito RDS permitindo a utilização de ferramentas avançadas como analisadores espectrais e osciloscópios por um preço extremamente baixo.

Para fins comparativos, atualmente o custo médio de um analisador espectral é de 35000 dólares, e o do osciloscópio é de 2500 dólares. O preço de um hardware RDS comum é de 700 dólares e um mais sofisticado é de 1700 dólares. Ou seja, o preço de um osciloscópio consegue pagar três unidades básicas



X CEEL - ISSN 2178-8308
24 a 28 de setembro de 2012
Universidade Federal de Uberlândia - UFU
Uberlândia - Minas Gerais - Brasil

ou mais do que uma unidade do módulo hardware mais sofisticado.

Além do baixo custo do conjunto a facilidade de manipular, desenvolver e implementar projetos de comunicações é um outro atrativo para a utilização em instituições de ensino, pois agiliza o processo de aprendizado e aplicações de técnicas na prática.

O USRP em sua essência implementa as sessões de processamento digital em banda base e frequência intermediária (FI) de um sistema de comunicação de rádio. O seu projeto básico consiste no processamento da forma de onda, como a modulação e demodulação, pelo computador ao qual está conectado. Porém, todas as operações de alta velocidade como as conversões digitais para cima ou para baixo e decimação e interpolação são realizadas e gerenciadas pela FPGA (Field Programming Gate Array) [2].

O USRP possui quatro Conversores Analógico/Digital (CAD's) de alta velocidade com 12 bits por amostra e uma taxa de amostragem de 64M amostras por segundo e quatro Conversores Digital/Analógico (CDA's) de alta velocidade com 14 bits por amostra e taxa de amostragem de 128M amostras por segundo. Os CAD's e CDA's estão conectados a uma FPGA modelo Altera Cyclone EP1C12 que utiliza uma interface USB 2.0 para conexão com um computador com o software GNU Radio [2], que está descrito mais adiante.

A Figura 2 [3] mostra a arquitetura básica do USRP.

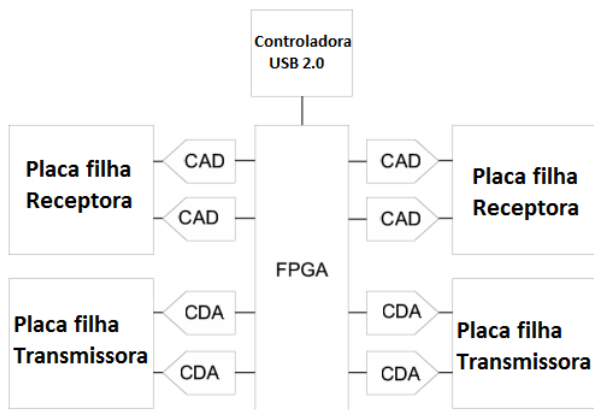


Fig. 2. Diagrama de blocos do USRP

Como a comunicação entre o USRP e o computador se dá através de uma interface USB 2.0, a taxa máxima de transferência total é de 32 MBps. Os dados transmitidos pela USRP estão no formato complexo, em que cada amostra é composta pela parte real de 16 bits e pela parte imaginária também de 16 bits resultando em 4 bytes por amostra complexa.

Assim a taxa real total a ser recebida ou transmitida pelo USRP via interface USB é de 32 MBps/(4 bytes) = 8 M amostras por segundo. Portanto a largura de banda máxima do sistema é 8 MHz [2]. A taxa de amostragem mantém uma relação direta com a largura de banda do espectro do sinal.

Uma outra particularidade deste sistema é a necessidade de interpolação para aumentar a taxa de transmissão e decimação para diminuir a taxa de recepção, pois os CDA's e CAD's do módulo operam com as taxas fixas de amostragem já descritas acima.

O GNU Radio é um kit de desenvolvimento de software livre para o sistema operacional Linux e provê o processamento de sinais em tempo real. Ele é estruturado em blocos de processamento para implementar o rádio definido por software utilizando o hardware externo de baixo custo como o USRP [4]. Os sistemas de comunicações são criados graficamente onde os blocos de processamento de sinal são ligados como num diagrama de blocos comum. Esses blocos são implementados em C++ e são integrados através da linguagem de programação Python [3]. A implementação desse sistema pode ser feita de forma gráfica e intuitiva através do software GNU Radio Companion (GRC) ou por linhas de comando diretamente no terminal Linux.

A funcionalidade do módulo hardware RDS em laboratório não se restringe apenas a implementações como analisador espectral e osciloscópio. A sua principal função é permitir a criação de uma ampla variedade de sistemas de comunicação tanto de transmissão quanto de recepção de sinais, inclusive no modo full duplex.

É praticamente inestimável o custo poupado na construção de um laboratório de comunicações quando equipa-se o mesmo com módulos hardware RDS pois todos os equipamentos básicos e componentes eletrônicos analógicos e digitais tornam-se dispensáveis uma vez que não será mais preciso adquirir moduladores, demoduladores, filtros, etc.

Diversos estágios de processamento digital de sinais de um sistema de comunicações podem ser implementados via software GNU Radio. E a utilização do GNU Radio adiciona uma série de vantagens a todas as citadas acima como a possibilidade de criação de novos sistemas de comunicações ou a personalização de qualquer estágio de acordo com novas especificações tanto para fins pedagógicos quanto para testes e análises mais precisas para desenvolvimento de novas técnicas de processamento de sinais.

A utilização da tecnologia RDS em laboratórios para fins educacionais contribui para o aprendizado dos estudantes pois as montagens dos experimentos são extremamente práticas, intuitivas e rápidas. Isso permite que o tempo gasto em manipulações de componentes e fiações, substituições de componentes defeituosos e com todos os outros procedimentos antes necessários agora seja gasto com a compreensão acerca do funcionamento e interação dos dispositivos e análise e interpretação de resultados e medidas dos experimentos. Essas melhorias contribuem para o melhor aprendizado e maior qualificação técnica na formação do engenheiro.

1) Para demonstra uma aplicação do conjunto USRP e GNU Radio foi desenvolvido um transmissor WBFM como prática da teoria da modulação WBFM.

II. MODULAÇÃO WBFM

A modulação FM é uma particularidade da modulação em ângulo ou exponencial. Um sinal modulado em FM é caracterizado pela Equação 1 [5].

$$\varphi_{FM}(t) = A \left[\cos \omega_c t + k_f \int_{-\infty}^t m(\alpha) d\alpha \right] \quad (1)$$

Na qual: ‘A’ é a amplitude do cosseno, ‘ ω_c ’ é a frequência da portadora em radianos por segundo, ‘ k_f ’ é a constante do modulador e ‘ $m(\alpha)$ ’ é a mensagem a ser transmitida.

Esta técnica consiste basicamente em utilizar a mensagem para modular em frequência o sinal da portadora transmitida. A modulação é realizada dentro de uma faixa fixa de frequência, denominada de desvio de frequência da portadora conforme mostra na Equação 2.

$$\Delta f = \frac{k_f m_p}{2\pi} \quad (2)$$

A Equação 1 na forma complexa é dada pela Equação 3.

$$\hat{\varphi}_{FM}(t) = Ae^{j[\omega_c t + k_f \int_{-\infty}^t m(\alpha) d\alpha]} \quad (3)$$

Define-se $a(t)$ conforme a Equação 4.

$$a(t) = \int_{-\infty}^t m(\alpha) d\alpha \quad (4)$$

Expandindo a exponencial $e^{[jk_f a(t)]}$ na equação 3, em série de potência, tem-se a Equação 5.

$$\hat{\varphi}_{FM}(t) = A \left[1 + jk_f a(t) - \frac{k_f^2}{2!} a^2(t) + \dots + j^n \frac{k_f^n}{n!} a^n(t) \right] e^{j\omega_c t} \quad (5)$$

Extraindo a parte real da Equação 4 tem-se a Equação 6.

$$\text{Re}[\hat{\varphi}_{FM}(t)] = A \begin{bmatrix} \cos \omega_c t - k_f a(t) \text{sen} \omega_c t \\ -\frac{k_f^2}{2!} a^2(t) \cos \omega_c t + \\ \frac{k_f^3}{3!} a^3(t) \text{sen} \omega_c t + \dots \end{bmatrix} \quad (6)$$

Se $|k_f a(t)| \ll 1$, o desvio de frequência torna-se muito pequeno o que caracteriza a modulação FM faixa estreita (NBFM) [5].

Se $|k_f a(t)| \gg 1$, o desvio de frequência torna-se muito grande o que caracteriza a modulação FM faixa larga (WBFM) com desvio de frequência igual a 75 kHz.

Pela regra de Carson a largura de banda WBFM pode ser aproximada por $2\Delta f$.

III. UTILIZAÇÃO DO GNU RADIO E USRP NA IMPLEMENTAÇÃO DE UM TRANSMISSOR WBFM ESTÉREO

Para transmissão de um sinal de áudio com efeito mais natural são transmitidos dois canais de áudio: L (esquerdo) e R (direito). Afim de garantir que qualquer receptor FM seja capaz de receber o sinal da transmissão do áudio estéreo, a transmissão deve ser feita de tal modo que os sinais L+R e L-R sejam enviados. [5]

Para a transmissão estereofônica estar em conformidade com o sistema monofônico, a amplitude de pico do sinal total estereofônico deve ser reduzida em 90% para acomodar o sinal piloto em 19 kHz que representará os 10% restantes. O sinal L+R é mantido em banda base enquanto o sinal L-R é centrado em 38kHz acima, ocupando uma largura de banda de 23kHz a 53 kHz.

O espectro do sinal de rádio FM entre 0 Hz e 53 kHz como descrito acima é apresentado na Figura 3.

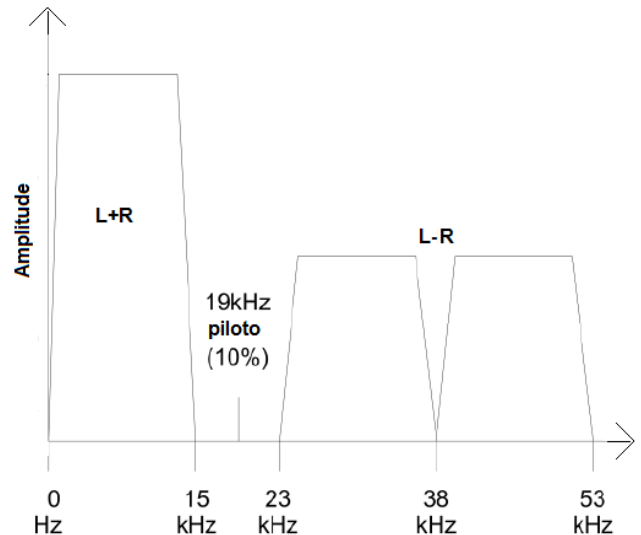


Fig. 3. Espectro da transmissão FM estéreo

Os três sinais são adicionados e enviados ao filtro de pré-ênfase para dar um ganho nas altas frequências do sinal banda base. Em seguida é feita a modulação em frequência do sinal utilizando um modulador com desvio de frequência padrão WBFM de 75 kHz.

Finalmente o sinal é enviado ao transmissor para a multiplexação do sinal numa determinada frequência que será a mesma a ser sintonizada pelos receptores.

Na Figura 4, a fonte de áudio é um arquivo com extensão MP3. Cada canal é amostrado a uma taxa de 32k amostras por segundo. Em seguida o fluxo de cada canal é inserido nas funções de soma e subtração. A saída do somador passa por um filtro de pré-ênfase descrito a seguir, e posteriormente é filtrada por um filtro passa baixa 2 que realiza também a interpolação por um fator igual a oito, resultando numa taxa de 256k amostras por segundo.

O filtro de pré-ênfase foi implementado através do filtro de resposta infinita ao impulso (IIR) existente no GNU Radio. O objetivo dessa filtragem é dar um ganho nas altas frequências do sinal em banda base para compensar as futuras atenuações que o sinal sofrerá devido as interferências de ruído do canal. [5]

A saída do subtrator passa por um filtro de pré-ênfase e posteriormente é filtrada por um filtro passa baixa 1 que também realiza uma interpolação, porém de fator quatro, resultando numa taxa de 128k amostras por segundo. O sinal da saída do filtro passa baixa 1 passa por um multiplicador que o multiplica por uma senóide de 38 kHz. O sinal resultante transladado de 38 kHz é filtrado pelo filtro passa faixa que além disso, realiza uma interpolação de fator dois, gerando também, um sinal de 256k amostras por segundo.

O sinal piloto, uma senóide com frequência igual a 19 kHz, é amostrado diretamente a uma taxa de 256k amostras por segundo.

Os três sinais de 256k amostras por segundo são adicionados e filtrados pelo filtro de pré-ênfase que antecede o modulador em frequência.

O sinal de saída desse filtro é modulado em frequência com desvio máximo de frequência da portadora de 75kHz. Esse sinal modulado passa por um filtro passa baixa, com frequência de corte de 100kHz, que é então transmitido ao módulo USRP, através de um cabo USB. Esse sinal é recebido pelo conversor CDA onde é feita a interpolação de fator 500 resultando num sinal com taxa de saída de 128M amostras por segundo. Finalmente, o sinal é multiplexado em uma determinada frequência a ser sintonizada pelos receptores.

Para transmissão foi utilizada a placa filha BasicTX, com faixa de frequência de 1 a 250 MHz e potência máxima de saída de 0.5mW. O sinal resultante foi irradiado ao meio externo através de uma antena acoplada a uma saída de rádio frequência (RF) do módulo USRP, após ser dado um ganho de 20dB.

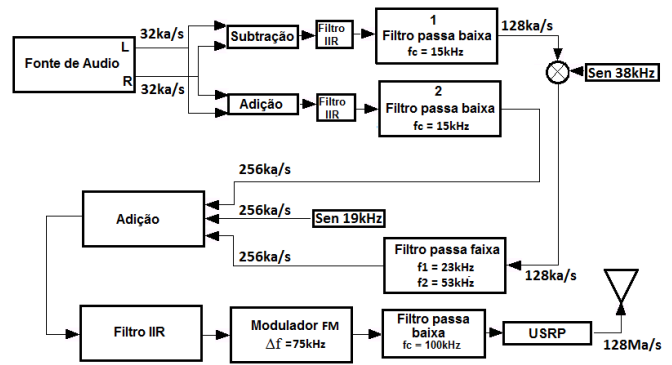


Fig. 4. Fluxograma do Sistema WBFM.

IV. RESULTADOS

Para construir o sistema WBFM utilizou-se o kit de desenvolvimento GNU Radio versão 3.3 e o USRP1, para implementar o fluxograma apresentado pela Figura 4, a montagem do sistema WBFM no GRC e suas respectivas ligações é mostrada na figura 5.

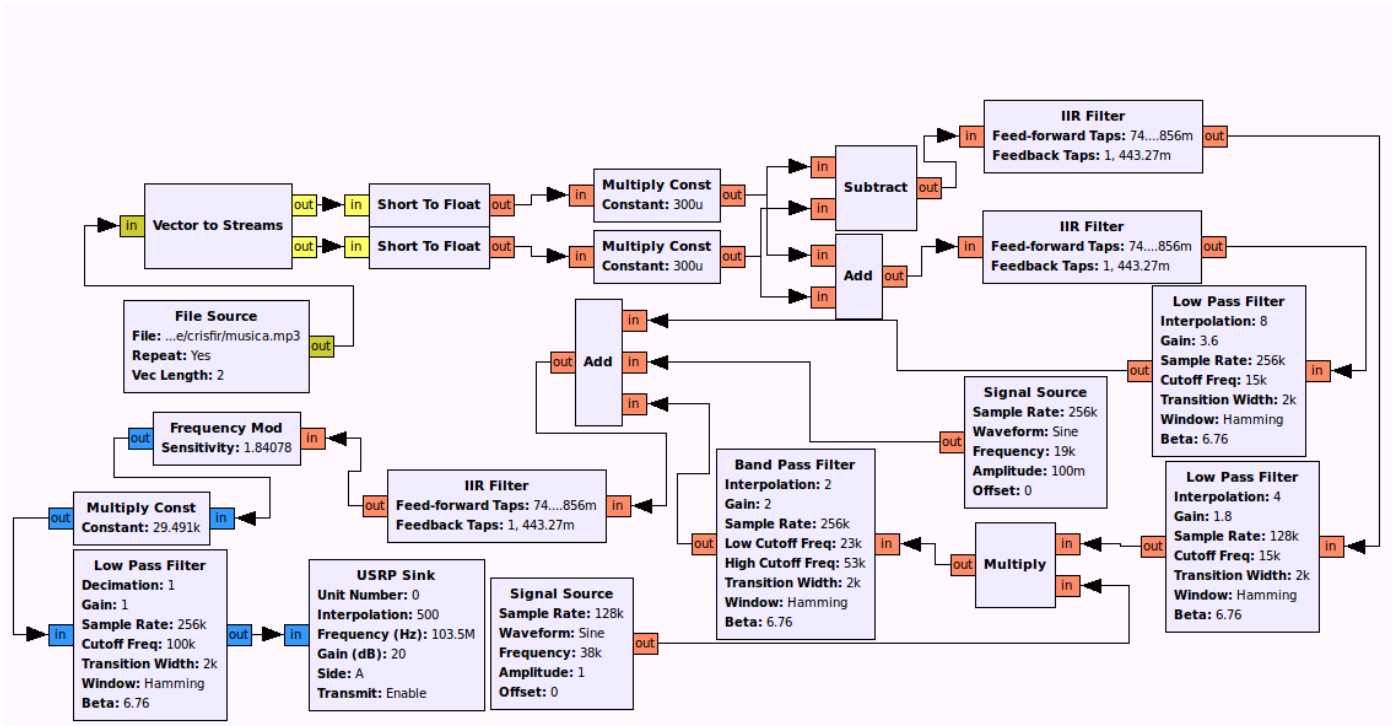


Figura 5 – Configuração em blocos desenvolvida no GNU Radio Companion.

Para a implementação do filtro de pré-ênfase utilizou-se o filtro IIR, disponível no GRC. A função transferência deste filtro é dada pela Equação 7 [6].

$$H_p(s) = \frac{\omega_2 s + \omega_1}{\omega_1 s + \omega_2} \quad (7)$$

Na qual, $\omega_1 = 2\pi f_1$; $\omega_2 = 2\pi f_2$;

A frequência $f_1=2,12$ kHz foi escolhida experimentalmente de modo a manter o mesmo valor de pico da mensagem com ou sem o filtro de pré-ênfase. A partir desta frequência é dado um ganho linear até a frequência $f_2 = 30$ kHz. A partir de f_2 estabiliza-se o ganho para que todas as frequências tenham o mesmo nível de amplitude na faixa do áudio a ser transmitido mesmo após a inserção do ruído pelo canal e o processo de de-ênfase [5]. A resposta em frequência dos três filtros IIR utilizados foi obtida através do programa MATLAB e é mostrada pela Figura 6.

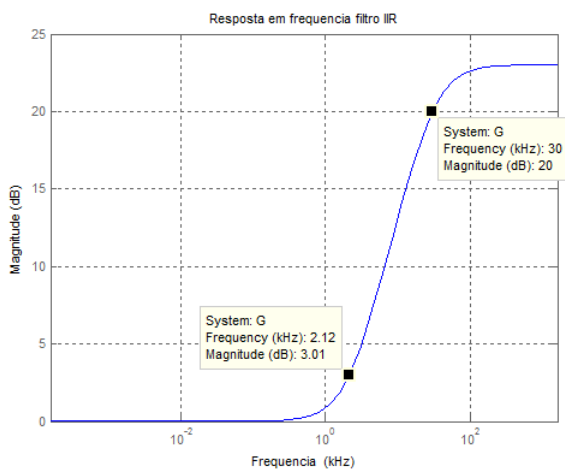


Fig. 6. Resposta em frequência do filtro IIR.

O espectro da Transformada Rápida de Fourier, FFT 1, obtido após a adição dos sinais em banda base foi capturado no ponto conforme a Figura 7 e está demonstrado na Figura 8.

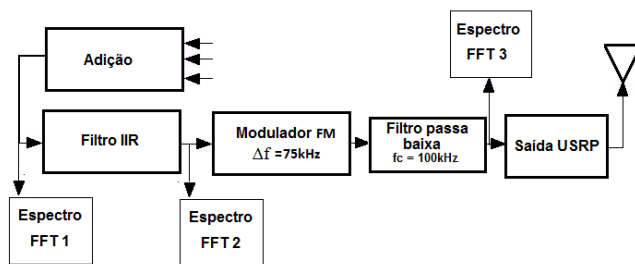


Fig. 7. Pontos de captura dos espectros FFT 1, FFT 2 e FFT 3.

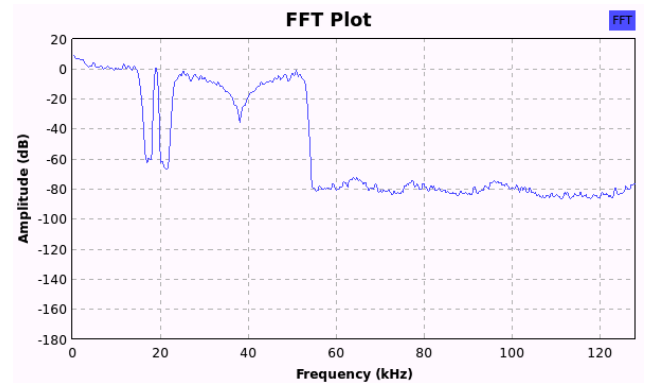


Fig. 8. FFT 1

Observa-se na Figura 8 o espectro do sinal de áudio L+R em banda base até a frequência de 15kHz, o sinal piloto em 19kHz e o sinal L-R de 23kHz a 53kHz centrado em 38kHz.

A Figura 9 mostra o espectro do sinal em banda base após a terceira filtragem de pré-ênfase, onde se observa o ganho a partir de 2,12kHz.

A inserção do terceiro filtro IIR que antecede o modulador FM foi necessária após a identificação da presença de ruído no áudio recebido por um receptor FM estéreo comum. Com o terceiro filtro IIR houve uma melhora significativa na qualidade do áudio recebido, além de permitir a identificação do efeito da pré-ênfase no espectro.

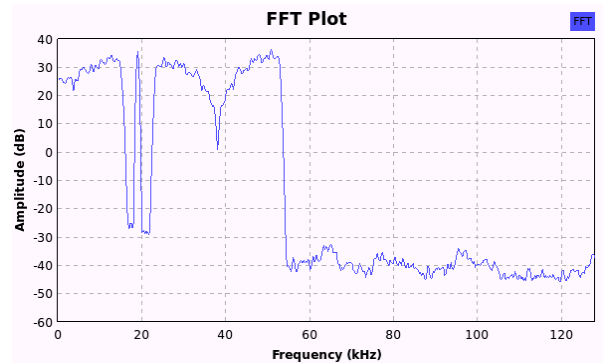


Fig. 9. FFT 2

A Figura 10 mostra o espectro do sinal em banda base da Figura 9 modulado em frequência, após a filtragem passa baixa com frequência de corte em 100 kHz para manter a largura de banda total do espectro em 200 kHz.

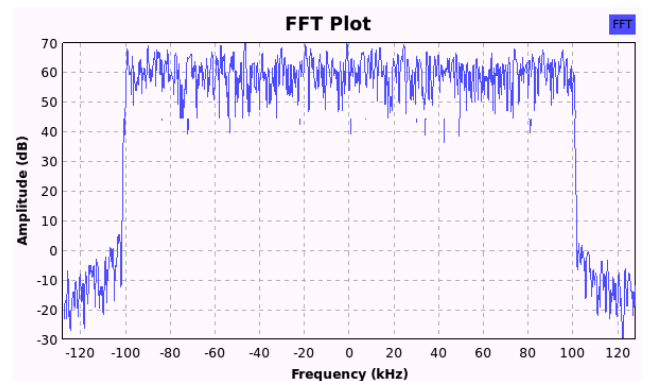


Fig. 10. FFT3

De posse de um receptor FM estéreo comum obteve-se sucesso na recepção do sinal transmitido localmente, sendo

possível ouvir claramente o áudio com a mesma qualidade quando comparada com a reprodução deste mesmo arquivo em um dispositivo compatível como um MP3 player.

V. CONCLUSÃO

O transmissor WBFM utilizando o GNU Radio e o USRP funcionou perfeitamente. Essa implementação permitiu a demonstração da eficiência da ferramenta de desenvolvimento GNU Radio e o módulo USRP e suas capacidades para desenvolvimento futuro de sistemas de comunicações mais complexos.

A criação deste transmissor demonstra a possibilidade de desenvolvimento de aplicações práticas das diversas teorias de telecomunicações, desde as mais simples até as mais complexas, permitindo também o ensaio de novos padrões de tecnologia em desenvolvimento de modo prático e simples.

Conclui-se que uso do GNU Radio aliado ao módulo USRP, permite que instituições de ensino equipem seus laboratórios com uma ferramenta extremamente poderosa de aplicações práticas de telecomunicações a um baixo custo.

Além de não ser necessária a aquisição de componentes eletrônicos, existe o respaldo ambiental em que a tecnologia se demonstra ecologicamente sustentável, não havendo descarte de protótipos mal sucedidos ou qualquer outro resíduo no meio ambiente quando utiliza-se o conjunto descrito neste artigo.

Com a utilização disseminada da tecnologia RDS nos laboratórios de ensino o consumo dos componentes eletrônicos será reduzido o que terá como efeito uma menor demanda desse produto originada por falhas em seu

funcionamento ou má utilização dos mesmos durante a prototipagem.

Essa redução de consumo diminui o descarte destes elementos no meio ambiente porque quando o sistema de comunicação implementado via software falhar, em nenhuma vez haverá necessidade de troca de componente queimado ou defeituoso, fato que ocorre frequentemente com estudantes que estão iniciando seu contato com a manipulação de componentes eletrônicos.

VI. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Valerio, D. “*Open Source Software-Defined Radio: A survey on GNU Radio and its applications*”. ftw. Technical Report, Áustria. Agosto de 2008.
- [2] Hamza, F. A. “*The USRP Under 1.5X Magnifying Lens!*” disponível em <http://gnuradio.org/redmine/attachments/download/129>. Acessado em 02 de Março de 2012.
- [3] Blossom, E. “*Exploring GNU Radio*” disponível em <http://www.gnu.org/software/gnuradio/doc/exploring-gnuradio.html>. Acessado em 03 de Março de 2012.
- [4] Ettus Research, “*Support: Downloads*” disponível em <http://ettus.com/support/downloads>. Acessado em 03 de Março de 2012.
- [5] Lathi, B. P. “*Modern Digital and Analog Communication Systems*” 3rd ed. Oxford University Press, 1998.
- [6] M. Rice, “*System Components*” and “*Signals and Systems 2*” em *Digital Communications a Discrete-Time Approach*, Upper Saddle River, NJ: Pearson, 2009.