

5

Medições

5.1.

Introdução

Este capítulo apresenta o cenário de medição em campo em um ambiente controlado interno (*indoor*) para a avaliação da interferência de canal adjacente produzida pela femtocélula LTE HeNB no Sistema Brasileiro de Televisão Digital. A avaliação da interferência no SBTVD considera o canal de televisão digital sintonizado na frequência de 695 MHz, que corresponde ao canal de televisão digital número 51 [32], e a femtocélula operando na faixa de 700 MHz.

Neste cenário de convivência as medições visaram avaliar a interferência de canal adjacente no SBTVD levando em conta diferentes distâncias de separação (entre 2 e 25 metros aproximadamente) e frequências de guarda ou offset entre a Femtocélula LTE e o SBTVD. Além disto, o objetivo das medições foi obter o raio de proteção entre estes sistemas para estabelecer os níveis de potência permitidos do sistema interferente que não afetem na recepção do sinal de TV digital.

O capítulo apresenta uma descrição dos equipamentos utilizados no cenário de medição.

5.2.

Cenário das Medições

As medições em campo foram realizadas nos laboratórios do INMETRO (Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia) [54] no Campus de Xerém que está operando no município de Duque de Caxias no estado do Rio de Janeiro, Brasil.



Fig. 84 Campus de Laboratórios do Inmetro [54]

A implementação do *setup* de medição foi realizada no prédio # 2 “Divisão de Metrologia” do campus do INMETRO, que conta com um espaço físico adequado para levar a cabo as medições. O corredor de aproximadamente 45 metros de comprimento possibilita o estudo do cenário interno (*indoor*) assumindo linha de visada entre os sistemas de estudo.



Fig. 85 Corredor Prédio #2, Inmetro.

As campanhas de medições foram realizadas ao longo de um período de um mês e meio, incluindo a montagem dos equipamentos de medição e a análise dos

dados de interferência. O início das campanhas de medição foi precedido por etapas prévias de avaliação do *setup* no laboratório do CETUC e no prédio #6 do Inmetro, e da realização de vários testes e avaliações em campo com o propósito de obter resultados confiáveis. No anexo, descrevem-se estes cenários de testes.

5.3. Cenário e Características das Medições

A avaliação da interferência considera um cenário controlado, que consiste de dois sistemas situados em um ambiente interno (*indoor*) uma configuração típica de radiodifusão de televisão digital modo 3 (8k), intervalo de guarda de taxa igual a 1/8 que corresponde um comprimento do intervalo de 126 μ s, uma taxa de *inner coding* igual a 3/4 e um *time interleaving* igual a 200 milissegundos, como é estabelecido em [28][31].

O cenário para interferência avaliado nas medições esta formado por dois sistemas: o “**Sistema Vitima**” representado pelo Sistema de Televisão Digital que inclui os equipamentos transmissor como receptor, e o “**Sistema Interferente**” formado apenas pelo transmissor interferente, a femtocélula LTE. Neste caso, foi necessário configurar um equipamento de radio USRP (*Universal Software Radio Peripheral*) [55], e instalar e configurar o software livre GNU Radio/ GNU Radio Companion [56] para funcionar como femtocélula. Na seção de “Anexos” desta dissertação, detalha-se os métodos de instalação do software GNU Radio- GNU Radio Companion no sistema operacional Ubuntu – Linux 12.04 LTS (*Long Term Support*).

O equipamento de rádio utilizado foi a USRP versão 2 N210 [55] operando na faixa de 700 MHz, equipado com uma placa *daughterboard* modelo WBX [55]. O equipamento de radio transmite um sinal OFDM (*Orthogonal Frequency Divison Multiplexing*) utilizando uma modificação desenvolvida na rotina (*benchmark_tx.py*) disponível no diretório do software livre GNU Radio [56]. A largura de faixa utilizada foi de 10 MHz, de acordo com os requisitos estabelecidos no padrão LTE para o enlace de descida, apresentados em [3] [26].

Foi utilizado o esquema de modulação BPSK e transmitidos diferentes níveis de potência.

Além disto, a LTE Femtocell-USRP transmitiu em diferentes frequências *offset* entre 700 e 705 MHz, com um passo de 1 MHz com o propósito de obter os níveis de potência máximos que não degradem significativamente a recepção do sinal de TV digital.

O transmissor e receptor do sistema vítima foram configurados considerando os requisitos do SBTVD estabelecidos pela ABNT em [28] [30][32], com a distância de separação entre ambos de aproximadamente 6 metros. No lado do transmissor, configurou-se o gerador de sinal [57] sintonizado na frequência 695.142857 MHz correspondente ao canal de TV digital 51 [28][30] [32] [57] com uma largura de faixa ocupada igual a 5.7 MHz, como é definido pela ABNT [28] e uma potência de transmissão igual a -5 dBm. Em cada um dos cenários foram utilizados três tipos esquemas de modulação típicos: 64 QAM, 16 QAM e QPSK. No lado do receptor, utilizou-se um decodificador do sinal de TV digital típico, com um *set top box* (STB) e uma televisão, para permitir a avaliação subjetiva segundo da sensibilidade à interferência do cenário em avaliação. Além disso, um analisador de espectro [58] foi usado para permitir a avaliação de rendimento quantitativo do sinal de televisão de teste (e.g. em termos do BER, MER e níveis da potência do sinal recebido).

A seguir, a figura 86 apresenta o setup de medição.

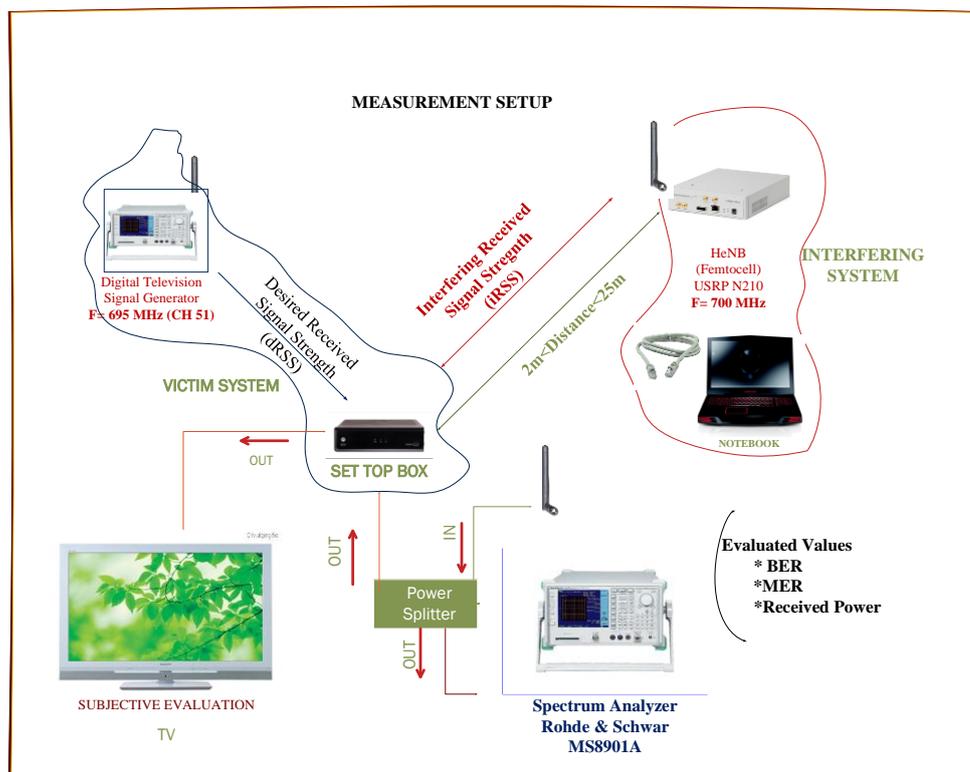


Fig. 86 Setup de Medição

5.3.1. Cenários para avaliação da interferência na TV digital

Os sinais de Televisão Digital foram transmitidos utilizando diferentes esquemas de modulação (QPSK, 16 QAM, 64 QAM) com o propósito de avaliar sua robustez e comportamento em presença da interferência de canal adjacente produzida pelo equipamento de radio USRP.

O cenário de avaliação de interferência consistiu em configurar diferentes distâncias de separação entre os sistemas vítima e interferente, variando aproximadamente de 2 a 25 metros. Além disso, diferentes níveis de potências de transmissão do sistema interferente foram consideradas, variando-as até aproximadamente 20 dBm.

Avaliaram-se também distintas frequências de guarda (*offset*) deslocadas em passos de 1 MHz a fim de obter o raio de proteção entre os sistemas que satisfaça aos requisitos e garanta o cenário de coexistência na faixa de 700 MHz.

O principal requisito, segundo o estabelecido em [28], [30] e [32], consiste em um valor do BER menor ou igual a $2 * 10^{-4}$ para garantir uma correta recepção do sinal de TV Digital. Além disso, a MER (*Modulation Error Rate*) deve garantir valores de interferência intersímbolo de modo a se conseguir uma boa qualidade do sinal de TV digital recebido.

É importante ainda considerar a avaliação subjetiva do sinal de TV digital recebido através do decodificador STB a fim de interpretar as flutuações dos valores do BER e da MER associados a cada cenário de convivência do SBTVD e LTE.

5.3.2. ***Universal Software Radio Peripheral (USRP)***

O equipamento de radio USRP ou *Universal Software Radia Peripheral* [55] foi desenvolvido por Matt Ettus, o principal criador do projeto GNU Radio. Este equipamento permite que computadores funcionem como radio configurado por software (*software radio*) com uma grande largura de faixa.

A USRP é utilizada para o monitoramento espectral e oferece registros de RF sendo capaz de estabelecer a interface entre um computador (interface digital) e equipamento de RF (analógico). Desta maneira combinam-se os sinais transmitidos e recebidos através da utilização de plataformas que permitem a configuração do equipamento.

O *software* da USRP suporta diversos sistemas operacionais como Windows, MacOS e LINUX utilizando plataformas de interface com o equipamento como, por exemplo, o GNU Radio, Simulink e LabView que utilizam o software UHD (*USRP Hardware Driver*), o software oficial para configurar e utilizar a USRP.

Neste trabalho foi instalado e configurado o sistema operacional Ubuntu – Linux 12.04 LTS (*Long Term Support*) e a plataforma de interface com o equipamento considerando a versão GNU Radio 3.6.5 [56] e o *software* UHD.

Estão disponíveis três tipos de versões da USRP, a versão 1 – Bus 100, versão 2, e a USRP versão N200/210. As principais características e diferenças

entre a versão 1 e a N200/210 são apresentadas na Tabela 20. A USRP versão 2 e a N200/210 apenas diferem no modelo do FPGA (*Field Programmable Gate Array*) utilizado, sendo que o FPGA da USRP 2 é o modelo Xilinx Spartan 3-2000.



Fig. 87 USRP versão 1 [55]



Fig. 88 USRP versão N200/210 [55]

Tabela 20. Características e Diferenças USRP 1/N200/210

| | USRP 1/Bus 100 | USRP (N200/N210) |
|--------------------------------|--|--|
| Fabricante | ETTUS RESEARCH | |
| Plataforma de Interface | GNU RADIO | GNU RADIO, LabView, Simulink |
| FPGA | Altera Cyclone (USRP 1) Xilinx Spartan 3A X3SD1400A | Xilinx Spartan 3A DSP XCSD3400A (N200) Xilinx Spartan 3A-DSP XCSD1800A (210) |
| Power | 100 Mw | |
| ADC's | 64 MS/s 12-bit | 100 MS/s 14-bit |
| DAC's | 128 MS/s 14-bit | 400 MS/s 16-bit |
| Figura de Ruído | 5 dB | |
| Largura de Faixa | 16 MHz | 50 MHz |
| Interface a PC | USB 2.0 (32 MB/s half duplex) | Gigabit Ethernet (1000 Mb/s) |
| Intervalo RF | DC – 5.9 GHz, definido pela daughterboard de RF. | |
| Aplicações | MIMO 2x2 (USRP1) Sensoriamento da Rede HF Communications (B100) Open BTS (B100) | <i>Cognitive Radio</i> Monitoramento do Espectro Gravação e <i>Playback</i> Sensoriamento da Rede Acesso Dinâmico na Rede MIMO MxN Implementação placa GPS (Sincronismo) |

Da tabela 20, descrevem-se os parâmetros mais importantes na arquitetura da USRP associados aos dispositivos ADC's e o DAC's:

- **ADC (*Analog to Digital Converter*).** – Este dispositivo é o responsável pela conversão dos sinais analógicos a digitais, atribuindo um número digital a cada nível de tensão para ser utilizado pelo sistema de processamento. Entre os principais parâmetros do ADC estão *Sample Rate* (Taxa de Amostragem), *Dynamic Range* (Intervalo ou Faixa Dinâmica), Tempo de Conversão e o Número de Níveis.
- **DAC (*Digital to Analog Converter*).** – Este dispositivo é um conversor digital a analógico que recebe a informação de entrada digital em forma de uma palavra de n bits e a converte em sinal analógico.

No *setup* de medição desenvolvido nesta dissertação foi utilizada a versão do equipamento USRP N210 apresentada na figura a seguir.

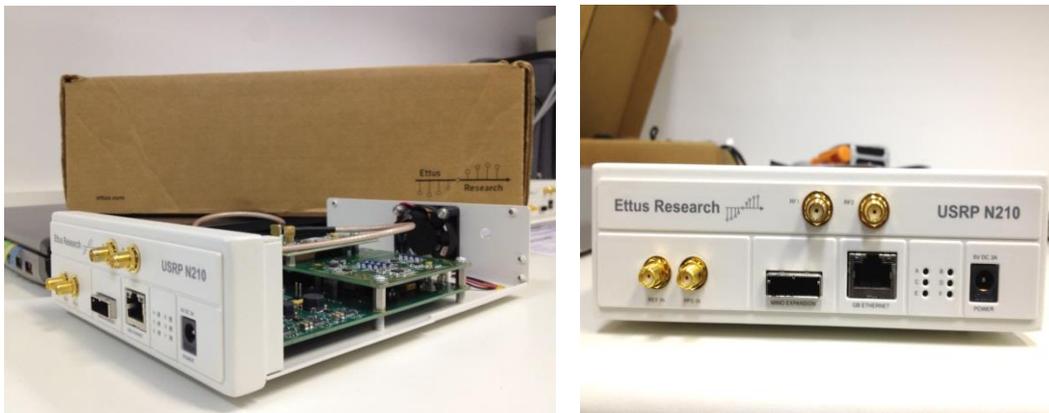


Fig. 89 USRP N210

Os componentes da interface entre o equipamento de radio USRP N210 e a plataforma GNU Radio – GNU Radio Companion instaladas no computador são mostradas no seguinte diagrama de blocos.

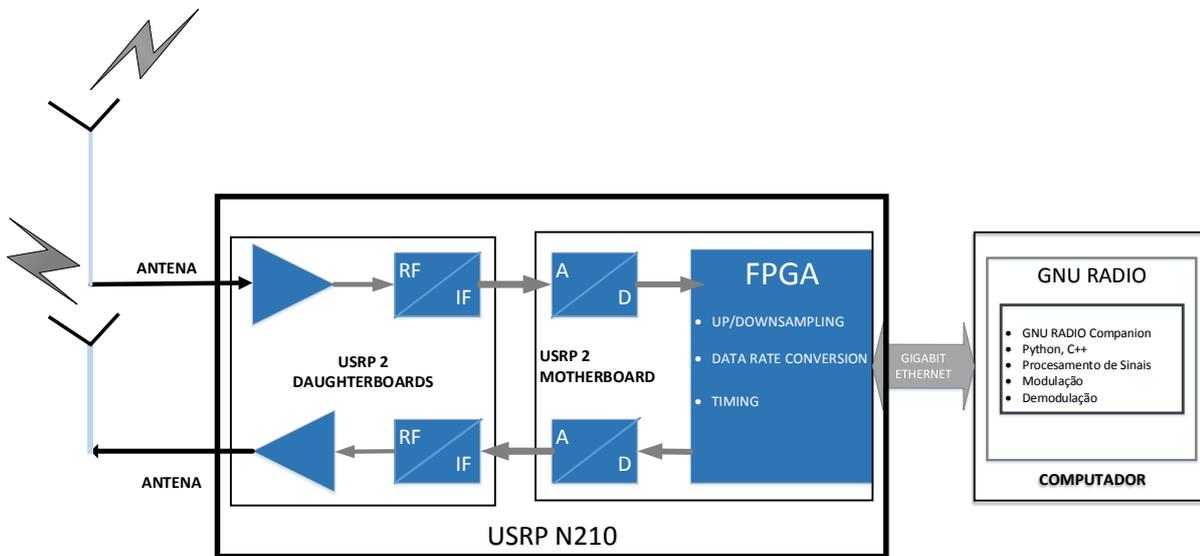


Fig. 90 Diagrama de Blocos da Interface USRP – Computador

Na Fig.90 se apresenta o Diagrama de Blocos da Interface USRP – Computador dividida basicamente em três blocos. O primeiro bloco (USRP 2 *Daughterboards* ou placas filhas) atua como a interface de RF, onde os sinais RF analógicos podem ser recebidos ou transmitidos pelas antenas ou podem ser conectadas usando conectores SMA nas portas SMA *daughterboard*. A parte de cima da Fig. 90 representa o enlace de descida (recepção) e a parte de baixo, representa o enlace de subida (transmissão).

A faixa de frequência do equipamento vai depender do tipo de *daughterboard* (placa filha) utilizada, que pode variar de DC a 5.9 GHz. Este bloco é conectado ao bloco do USRP 2 *Motherboard* (Placa Mãe).

O bloco do meio (USRP 2 *Motherboard* ou placa mãe) é onde a inteligência do hardware é implementada, estabelecendo a interface entre o digital e o analógico. Os sinais analógicos (IF) são convertidos a amostras digitais combinando-as a banda base no FPGA (*Field Programmable Gate Arrays*) sendo esta a parte mais importante no sistema da USRP, a que realiza as operações matemáticas e gera a taxa de dados que pode ser enviado através da interface Gigabit Ethernet. Todos os dispositivos ADC's e DAC's estão conectados no FPGA, sendo os responsáveis pela execução do processo de up/downsampling.

Os dados amostrados pela FPGA são enviados pela interface de Ethernet e no último bloco (computador) o processamento dos sinais é desenvolvido na plataforma GNU RADIO e GNU Radio Companion.

O GNU Radio é uma plataforma em código aberto que fornece vários blocos de processamento de sinais já programados para a criação de sinais e posterior análise. No GNU RADIO, assim como o programa GNU RADIO COMPANION (GRC), são utilizados as linguagens de programação Python e C++. No anexo desta dissertação apresentam-se exemplos desenvolvidos de aplicação utilizando GNU RADIO, GRC e a USRP.

5.3.2.1.

RF *Motherboards* (Placa Mãe) e *Daughterboard* (Placa Filha)

O equipamento de radio USRP tem dois tipos de placas, a primeira correspondente à placa RF *Motherboard* (Placa Mãe) e a segunda à placa RF *Daughterboard* (Placa RF Filha Desmontável), apresentadas nas Fig. 91 - 92.

Os modelos das placas a escolher dependerão do tipo de aplicação experimental a ser desenvolvida.

Os diferentes modelos de RF *Daughterboard* (Placa RF Filha) são apresentados na Tabela 21 e de alguns exemplos de aplicação na Tabela 23.

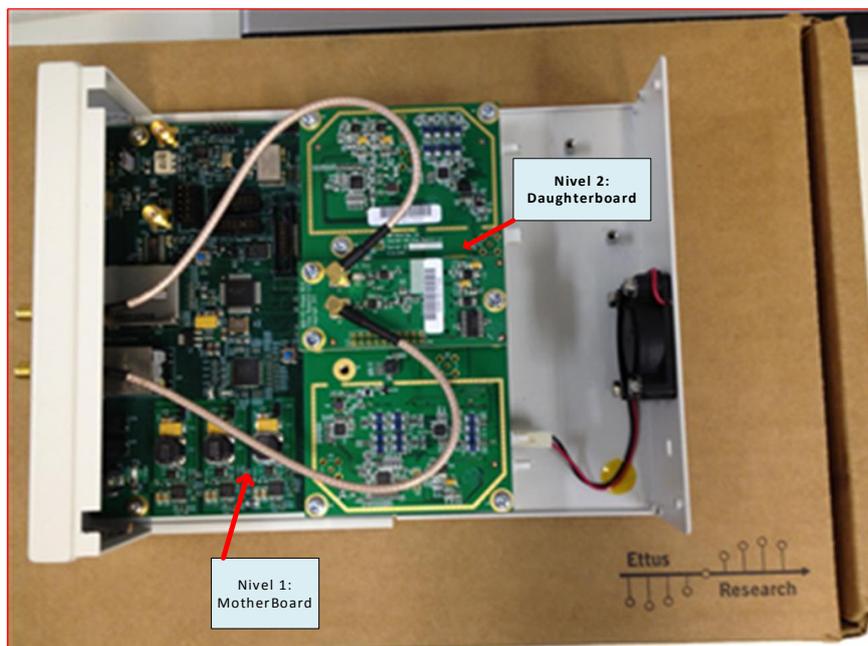


Fig. 91 RF Motherboard e Daughterboard

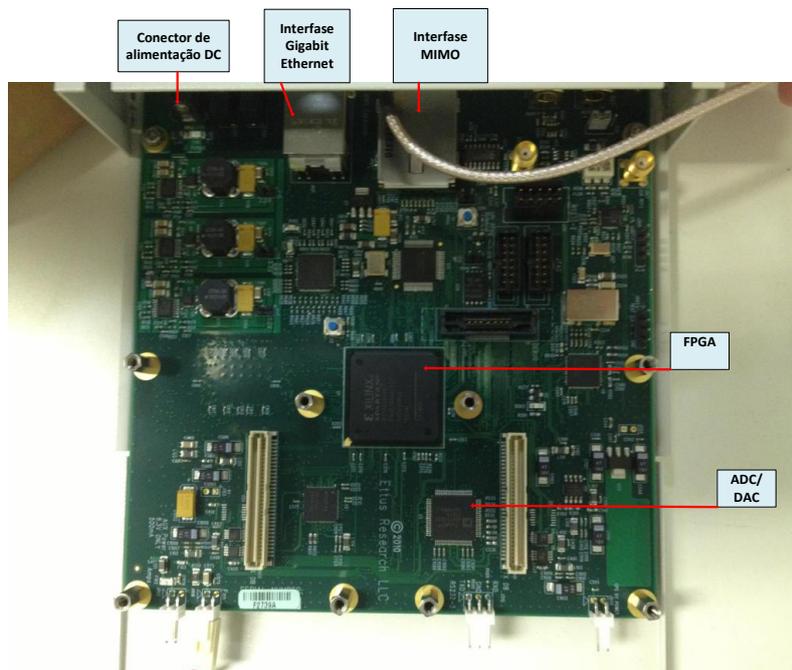


Fig. 92 RF Motherboard ou Placa Mãe

Tabela 21. Modelos da Placa Daughterboard [55]

FD= Full Duplex, HD= Half Duplex, IF= Intermediate Frequency, Q=Quadrature Interface

| Modelo Placa Daughterboard | Banda de Frequência | Channel Count/Features | Largura de Faixa |
|------------------------------|------------------------------------|------------------------|---|
| Apenas Recepção | | | |
| LFRX | 0 – 30 MHz | 2 Rx IF, or 1 IQ | 30 MHz/Channel |
| BasicRX | 1 – 250 MHz | 2 Rx IF, or 1 IQ | 100 MHz/Channel |
| TVRX2 | 50 – 860 MHz | 2 Rx IF, AGC | 10 MHz |
| DBSRX2 | 800 MHz – 2.3 GHz | 1 Rx IQ | 1-60 MHz |
| Apenas Transmissão | | | |
| LFTX | 0-30 MHz | 2 Rx IF, or 1 IQ | 30 MHz/Channel |
| BasicTX | 1-250 MHz | 2 Rx IF, or 1 IQ | 100 MHz/Channel |
| Tranmissão e Recepção | | | |
| WBX | 50 MHz – 2.2 GHz | 1 Tx IQ, 1 Rx IQ, FD | 40 MHz |
| SBX | 400 MHz – 4 GHz | 1 Tx IQ, 1 Rx IQ, FD | 40 MHz |
| XCVR2450 | 2.4 GHz – 4.5 GHz 4.9 – 5.9 GHz | 1 Tx IQ, 1 Rx IQ, HD | Tx: 24,36,48 MHz Rx: 15,19,28,36 MHz |
| RFX900 | 750 – 1050 MHz | 1 Tx IQ, 1 Rx IQ, FD | 40 MHz |
| RFX1200 | 1.15 GHz – 1.45 GHz | 1 Tx IQ, 1 Rx IQ, FD | 40 MHz |
| RFX1800 | 1.5 GHz – 2.1 GHz | 1 Tx IQ, 1 Rx IQ, FD | 40 MHz |
| RFX2400 | 2.3 GHz – 2.9 GHz | 1 Tx IQ, 1 Rx IQ, FD | 40 MHz |

Nesta dissertação foi implementada e montada na placa RF Motherboard da USRP N210 o tipo de placa filha *Daughterboard* WBX, cuja faixa de frequência satisfaz aos requisitos do cenário de medição proposto.

A placa WBX fornece uma potência de transmissão de até 100 mW e uma figura de ruído de 5 dB [55]. A WBX é um transceptor de banda larga que provê 40 MHz de largura de faixa e é ideal para aplicações com diferentes bandas entre 50 MHz até 2.2 GHz [55].

Outras características desta placa são apresentadas a seguir.

Tabela 22. Características placa WBX

| | |
|--------------------------------|---|
| Banda de Frequência | 50 MHz - 2.2 GHz |
| Figura de Ruído | 5 dB |
| Sensibilidade | -130 dBm |
| IIP2 | 40 – 55 dBm |
| IIP3 | 5-10 dBm |
| Ganho máximo Rx | 70 dB |
| Antena | TX/RX, RX2 |
| Potência de Transmissão | 50 – 100 mW (< 1 GHz) 30 – 100 mW (> 1GHz) |
| Aplicações | Comunicações Móveis Terrestres, Marítimas e Aéreas, Estações Base, PCS, GSM, Radares, Redes sem fio, Radiodifusão TV, White Spaces. |

Fig. 93 Placa *Daughterboard* WBX (Placa Filha Desmotável)

Tabela 23. Aplicações e Placas Daughterboard sugeridas

| Exemplos de Aplicação | Banda de Frequência | Transmissor/ Receptor | Daughterboard Recomendada |
|--|---------------------------------------|-----------------------|---------------------------|
| Recepção de Transmissão de sinal de TV | 50-806 MHz | Apenas Rx | TVRX2, WBX |
| Recepção GPS | L1 – 11575.42 MHz L2 – 1227.60 MHz | Apenas Rx | DBSRX2, WBX, SBX |
| GPS Record e Playback | L1 – 1575.42 MHz L2 – 1227.60 MHz | Rx/Tx | WBX |
| OpenBTS GSM <i>Basestation</i> | GSM 900 – 890 – 960 MHz | TX e RX | WBX, SBX |
| WiMax | 2.5 GHz | Apenas Rx | SBX |
| <i>Broadcast FM Reception</i> | 88 – 108 MHz | Apenas Rx | TVRX2, WBX |
| 802.11 B/G/N Development | 2.4 GHz, 5 GHz | Tx e Rx | XCVR2450 |
| <i>HF Communications</i> | 3-30 MHz | Tx e Rx | LFRX + LFTX |
| Amateur Radio 2M, 70cm, 33 cm, 23 cm | 144 MHz, 430 MHz | Tx e Rx | WBX |
| Public Safety/P25 VHF | 136-174 MHz | Tx e Rx | WBX |
| <i>Radar Research</i> | 2-4 GHz | Tx e Rx | SBX |

5.3.3. GNU RADIO – GNU RADIO COMPANION

O GNU RADIO é um software livre de código aberto que fornece blocos de processamento de sinais que pode ser implementado em hardware de RF para desenvolver rádios definidos por software (SDR, *Software Defined Radio*) ou em um ambiente de simulação sem a necessidade de incluir hardware [56].

As aplicações em GNU Radio são feitas na linguagem de programação Python e as funções de processamento de sinais são escritas em C++ considerando como ambiente de trabalho o Sistema Operacional Linux - Ubuntu. Além disso, existem várias outras opções para utilizar o GNU Radio sem necessidade de

desenvolver os programas, utilizando a ferramenta GNU Radio Companion (GRC).

O GNU Radio Companion (GRC) [59] [60] [61] consiste em uma interface gráfica similar ao programa Simulink em Windows, que permite desenvolver aplicações de processamento de sinais utilizando um conjunto de blocos disponíveis no software. Com estes blocos não é necessário criar um programa em C++ ou Python, pois o GRC vai gerar automaticamente o arquivo e o código nestas linguagens de programação.

A instalação do GNU Radio e do GNU Radio Companion apresentam um grau de complexidade relativamente alto, requerendo um conhecimento do sistema operacional LINUX, conceitos teóricos da área de comunicações e processamento digital de sinais, além disso, capacidade de programação na linguagem Python e C++ orientada a objetos.

Os passos para a correta instalação detalham-se no anexo desta dissertação incluindo basicamente de dois métodos pelos quais pode se fazer a instalação do GRC. No anexo apresenta ainda uma seção com alguns exemplos de aplicação utilizando o GRC e a USRP.

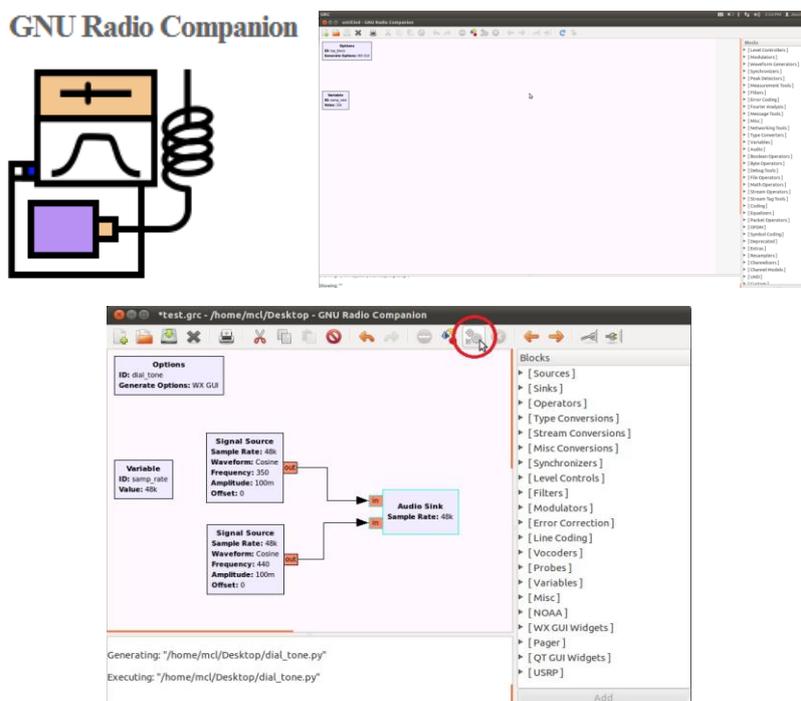


Fig. 94 GNU Radio Companion (GRC)

5.3.3.1. Benchmark_tx.py

Para a configuração do sinal OFDM a ser transmitido pela USRP (femtocélula) foi utilizado o programa disponível no diretório do GNU RADIO. Este programa está operando em:

```
$ cd /usr/local/share/gnuradio/examples/digital/ofdm
```

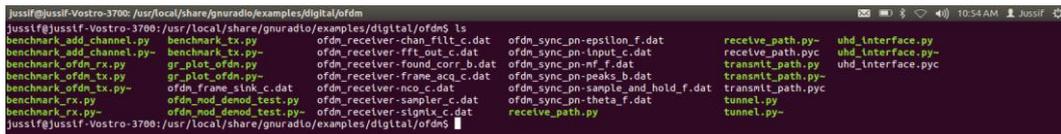


Fig. 95 Pastas no GNURADIO

Neste diretório, têm se disponíveis dois programas importantes, o primeiro é o programa **benchmark_tx.py**, responsável pela transmissão do sinal OFDM e pela configuração dos parâmetros. Estes parâmetros estão definidos nos requisitos do sistema móvel LTE Release 10 femtocell apresentados na Tabela 24.

O segundo programa é o **benchmark_rx.py** responsável pela recepção do sinal OFDM de teste. Nesta dissertação, foi utilizado apenas o programa responsável pela transmissão do sinal OFDM incluindo modificações desenvolvidas na linguagem python a fim de obter o sinal OFDM requerido no nosso caso específico.

Tabela 24. LTE Requisitos

| | |
|---------------------------------------|------|
| Frequência (MHz) | 700 |
| Largura de Faixa (MHz) | 10 |
| Largura de Banda Efetiva (MHz) | 9 |
| Número de Portadoras | 600 |
| Fast Fourier Transform (FFT) | 1024 |
| Largura do Prefixo Cíclico | 128 |

Os gráficos apresentados a seguir, mostram a transmissão em tempo real do sinal OFDM, considerando uma frequência central de 700 MHz e uma largura de banda do sistema de comunicação de 10 MHz.

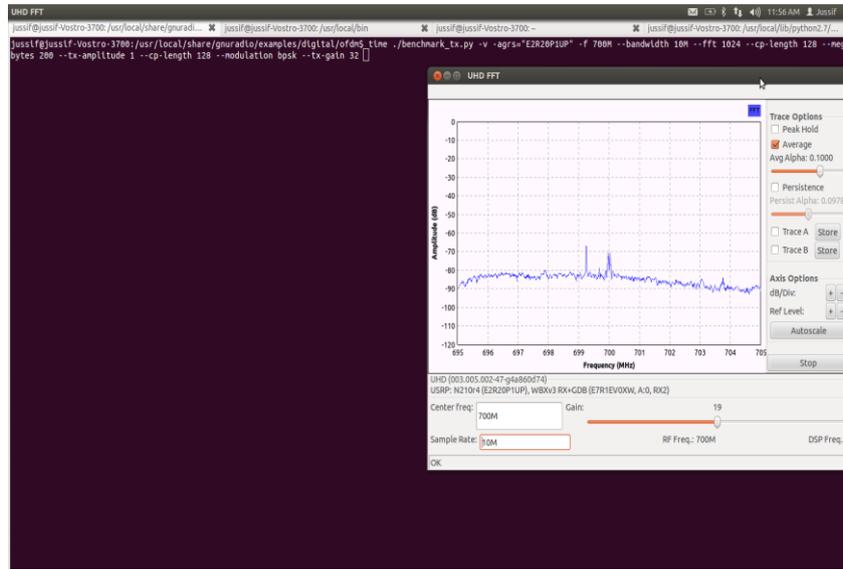


Fig. 99 Sem Transmitir

5.3.4. Avaliação da Potência de Transmissão da USRP

Antes de iniciar qualquer tipo de teste com o equipamento de radio USRP deve-se realizar a calibração do equipamento a fim de reduzir os problemas devido ao vazamento da potência transmitida, a presença de espúrios *in-band* e *out-band*, e a aparição do DC offset. Entre os principais problemas gerados estão o deslocamento em fase e quadratura do sinal a ser transmitido, e problemas de sincronização prejudicando o correto funcionamento do USRP.

O processo de calibração do USRP é descrito em mais detalhe na seção de **Anexos. Calibração** desta dissertação.

A seguir apresenta-se a avaliação da potência de transmissão da USRP considerando dois tipos de sinais, um sinal continua (CW) e o outro sinal OFDM. Para conseguir realizar este teste foi utilizado o programa disponível no diretório do software livre GNU Radio conhecido como \$ **uhd_siggen**. Este programa consiste em um arquivo no qual pode se gerar diferentes tipos de sinais: Constantes, Sinusoidal Complexa, Ruído Uniforme, Ruído Gaussiano, *Sweep*, Dois tons, podendo se avaliar o desempenho de cada uma delas no equipo USRP.

Uma vez executado o programa pode-se escolher entre diferentes tipos de sinais a gerar. Neste caso foi utilizado o sinal do tipo constante (*constant*) centrado em 700 MHz, com uma amplitude que pode variar entre 0 e 1, mantendo este valor fixo em 1. Além disto, tem-se o parâmetro \$ **TX GAIN (dB)** que pode se variar entre a 0 a 31 dB.

A fim de avaliar o sinal gerado foi necessário utilizar o analisador de espectro portátil Rhode & Schwarz FSH8, com capacidade de varredura ente 10 MHz até 18 GHz, e uma USRP N210 montada com uma placa WBX conectada diretamente no analisador de espectro.

A USRP N210 foi controlada diretamente desde o computador, variando apenas os valores do ganho de transmissão dentre 0 e 31 dB.

A figura seguinte detalha o setup de teste.

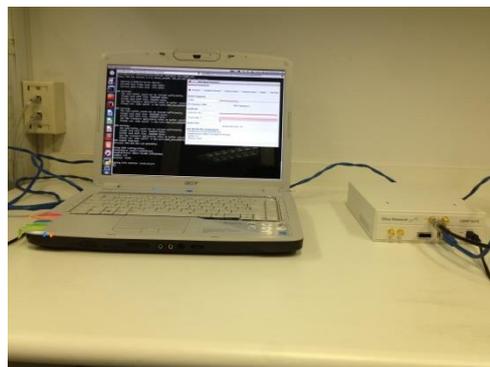
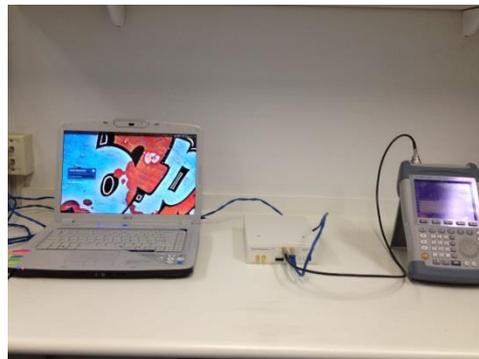


Fig. 100 Setup de Teste

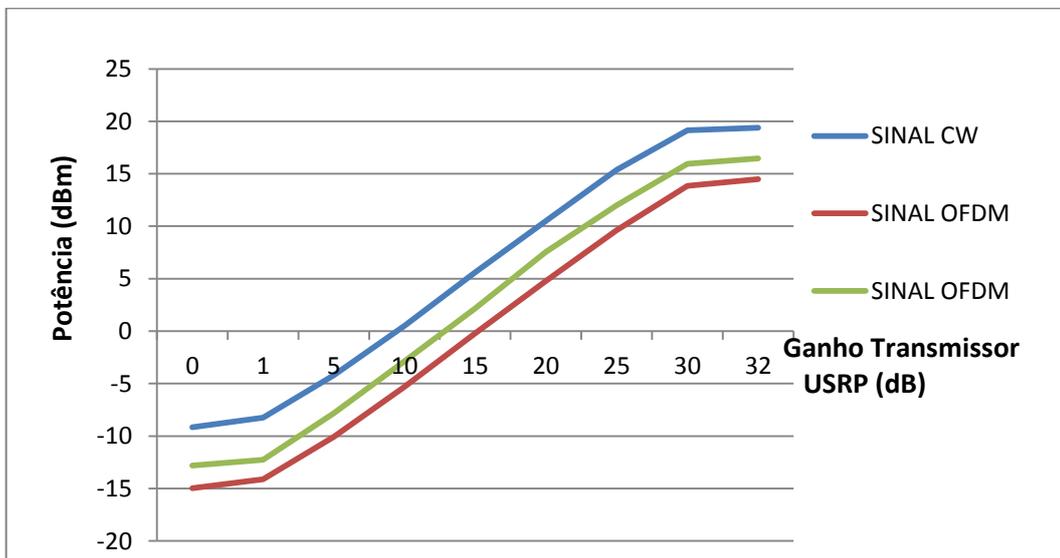
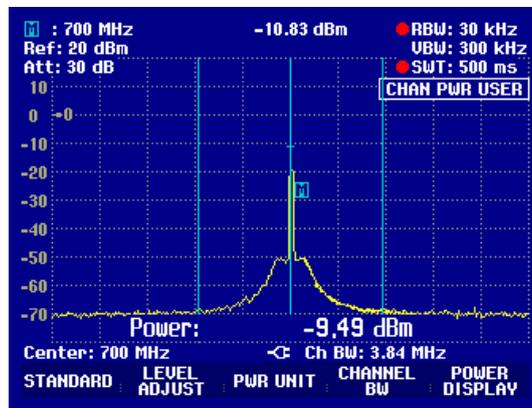
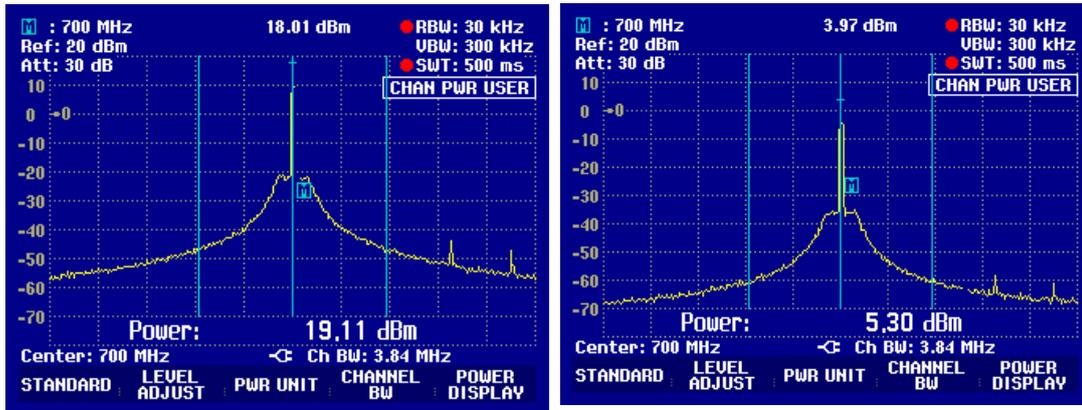


Fig. 101 Avaliação da Potência

Primeiramente, foi transmitido um sinal contínuo (CW) para avaliar a potência de transmissão da USRP, modificando o ganho de transmissão do equipamento entre 0 e 31 dB. A seguir, foi transmitido um sinal OFDM de 10 MHz de largura

banda modificando os valores do ganho de transmissão de 5 em 5 dB. Este teste foi realizado várias vezes a fim de comparar os resultados obtidos.

A variação da potência de transmissão da USRP, expressa em dBm é apresentada na figura a seguir.

Na figura observa-se que transmitindo um sinal CW a potência máxima de transmissão obtida oscila entre 18 e 19 dBm, próxima do valor estabelecido de 20 dBm [55] [56].

Quando se transmite um sinal OFDM a variação da potência de transmissão é de aproximadamente 3 a 5 dB em relação ao valor máximo definido de 20 dBm, obtendo-se potências entre 15 e 16.5 dBm.

5.3.5. Equipamentos de Televisão Digital

Nesta seção são apresentados em detalhe os equipamentos utilizados para a geração do sinal de TV digital de teste segundo o estabelecido pela ABNT e ANATEL. Os parâmetros da configuração foram apresentados na Tabela 7 do capítulo 2.

5.3.5.1. Transmissor de Televisão Digital

O equipamento utilizado para a transmissão do sinal de TV Digital de teste é o Rohde & Schwarz SFU Broadcast Test System [62].



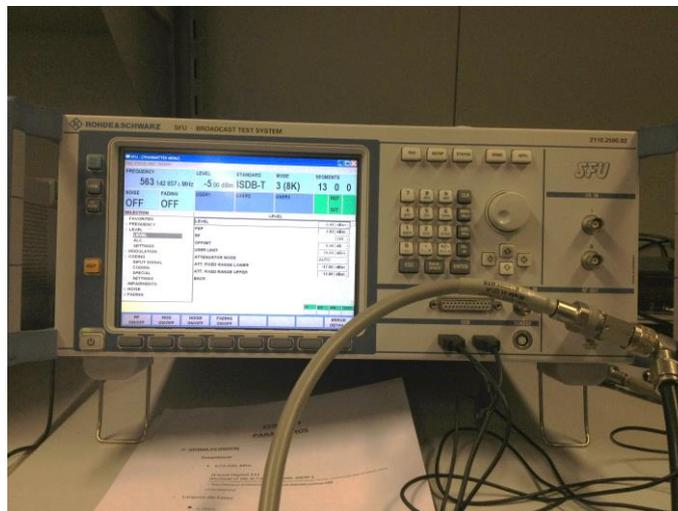
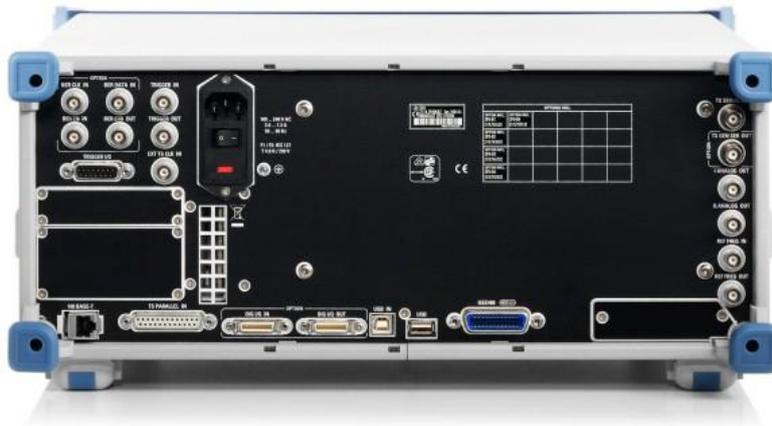


Fig. 102 R&S SFU Broadcast Test System

O equipamento R&S SFU Broadcast Test System é um gerador de sinais que fornece uma plataforma na qual pode se configurar todos os padrões de TV digital e transmissores de áudio.

Entre as principais tecnologias suportadas por este equipamento estão os padrões de Televisão Digital Terrestre (DVB-T, ATSC, ISDB-TB) e Móvel (DVB-H, ATSC-M/H, ISDB-T 1seg). Além disso, dispõe-se dos padrões de Televisão Digital por Cabo e Satélite, Transmissores de Sinais de Audio (AM, FM), Televisão Analógica, Video Coding (MPEG-2, MPEG-4, H.264, AVC), Configurações de Audio (AC3, AAC, AAC+) e padrões de vídeo como PAL, NTSC, SECAM [70].

Entre as principais facilidades [70] apresentadas pelo equipamento têm se:

- Gerador de Sinais de Referências Multi-Padrão com codificação em tempo real.
- Gerador de Sinais de Referências em um intervalo de frequências amplo.
- Capacidade de simulação de propagação multipercurso, redes de frequência única e redes a cabo.
- Capacidade de simulação de cenário de interferência de canal adjacente.
- Gerador de ruído com AWGN, ruído impulsivo e ruído de fase.

As principais características técnicas [62] do equipamento são apresentados na Tabela 25.

Tabela 25. Características Técnicas Gerador Rohde & Schwarz

| Sinal RF | |
|--|---|
| Intervalo de Frequência | 100 kHz a 3.0 GHz |
| Resolução de Frequência | 0.1 Hz |
| Potencia (<i>Level</i>) | -120 dBm a +30 dBm |
| Nível de precisão | <0.5 dB |
| Pureza Espectral | |
| Ruído de Fase (a 1GHz) | <-131 dBc (20 kHz portadora offset/1Hz) |
| Ruído de Banda Larga (desde 200 MHz a 1.5 GHz) | <-135 dBc (>10MHz portadora offset/1Hz) |
| Modulação de Sistemas de TV digital em Tempo Real | |
| TV Terrestre | DVB-T2, DVB-T, DTMB, ISDB-T, ISDB-T _B , ATSC/8VSB |
| TV a cabo | DVB-C2, DVB-C, J.83/B, ISDB-C |
| TV por satélite | DVB-S2, DVB-S, DIRECTV, ISDB-S |
| TV móvel | DVB-H, T-DMB, ISDB-T 1 Seg, CMMB, MediaFLO, ATSC-M/H |
| Transmissões de audio digital | DAB, DAB+, ISDB-T _{SB} |
| Sistemas de Modulação analógicas em Tempo Real | |
| TV analógica | B/G, D/K, I/I1, M/N, L/L |
| Transmissões Analógicas de Audio | AM, FM mono, FM stereo com RDS |
| Sistemas de Modulação baseado em AWG | |
| Transmissões Digitais de Audio | HD Radio, DRM, DRM + |
| TV Digital | DVB-T2, CMMB, MediaFLO |
| Simulações e Funções de Análise | |
| Gerador de AWGN (Signal to Noise Ratio) | desde -30 dB até +60 dB |
| Simulador de Desvanecimento | Número de Percurso 20 |
| | Perfis de Desvanecimento (percurso estático, fase constante, doppler puro, Rayleigh, Rice, Gaussiano) |
| | Tempo de Resolução 10 ns |
| Gestão do interferente | Nível de Intervalo desde -60 dB até +60 dB |
| | Frequência Offset -40 MHz a + 40 MHz |
| Medida do BER | ASI, SPI, SMPT310 |

5.3.5.2. Receptor e Analisador de Redes de Televisão Digital

No receptor foi utilizado um decodificador Set Top Box (STB) de sinais de televisão digital típico e de uma televisão para permitir as avaliações subjetivas do sinal de TV digital recebido.



Fig. 103. Set Top Box e TV

O **Analisador Vectorial de Redes** de Televisão Digital foi o modelo MX8901A Anritsu [63] que utiliza o software MS890110A ISDB-T *Field Measurement Software*.

As métricas disponíveis neste software consideram o modo Medida em campo (*Field Strength*), Perfil de Retardo (*Delay Profile*), Bit Error Rate (**BER**), Potência de Recepção. Além disso, para obter as medidas da MER (*Modulation Error Rate*) é necessário instalar o software MS890120 B ISDB-T *Signal Analysis*, programa que já se tinha disponível no equipamento utilizado.

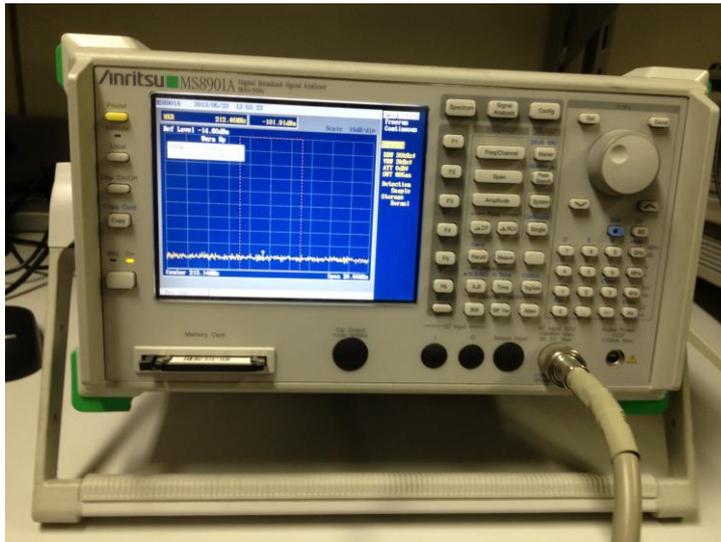
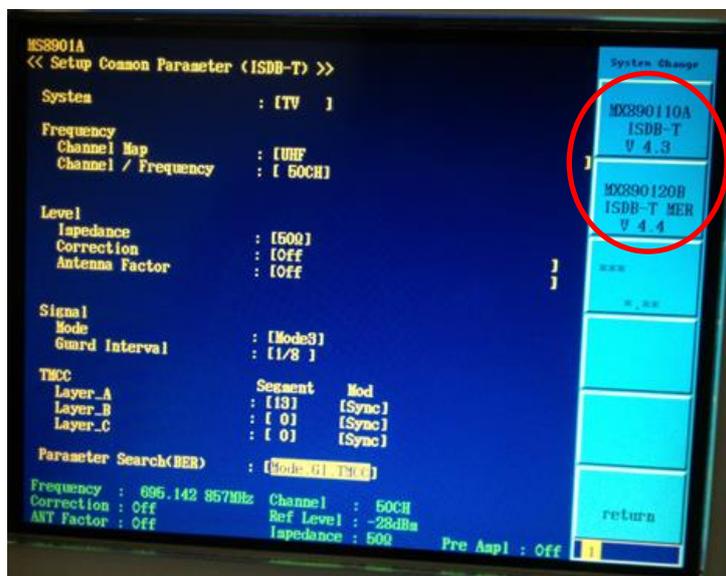


Fig. 104 Analisador de Redes Anritsu MS8901A

A figura abaixo apresenta em detalhe os dois programas que executam as leituras das métricas da MER e da BER instalados no equipamento.



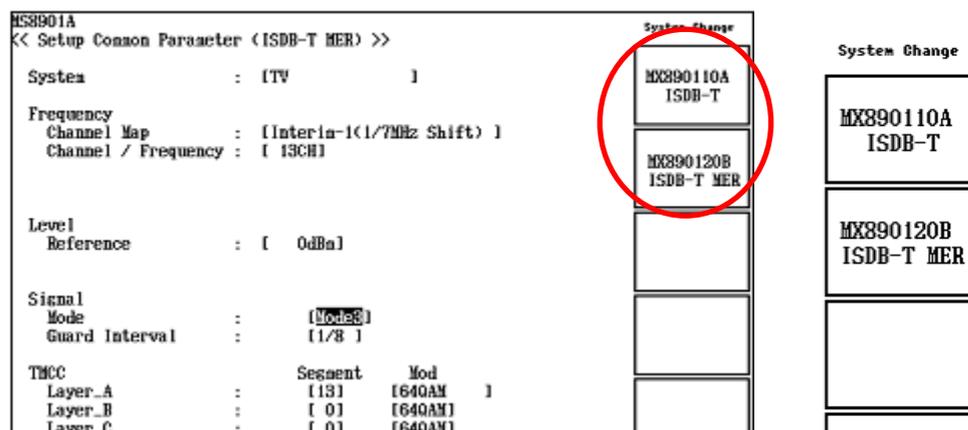


Fig. 105 Seleção do Software para avaliação da MER ou do BER

5.3.5.3. Características das Antenas

As antenas utilizadas nas medições foram do tipo antena omnidirecional instalada na USRP e as antenas log periódica e diretiva utilizadas para recepção e transmissão do sinal de TV digital, respectivamente. Nas seções seguintes detalham-se as características de cada uma destas.

5.3.5.3.1. Antenas da USRP

A fim de estabelecer o cenário adequado foi realizada uma série de testes de transmissão da USRP, descritos com mais detalhe nos anexos deste documento.

Primeiramente optou-se por utilizar uma antena Log Periódica 0410 [64] a fim de avaliar o desempenho do equipamento. As características [64] desta antena são apresentadas a seguir.

Tabela 26. Características da Antena

| Log Periodic 0410 | |
|-------------------|----------------|
| Frequência | 400 – 1000 MHz |
| Ganho | 5 – 6 dBi |
| Polarização | horizontal |



Fig. 106 Antena Log Periodic 0410

A antena Log Periódica 0410 fornecida pela ETTUS traz um adaptador SMA que precisa ser soldado cuidadosamente [65] para estabelecer a correta conexão e manter o seu diagrama de radiação sem interferir com as propriedades da antena.

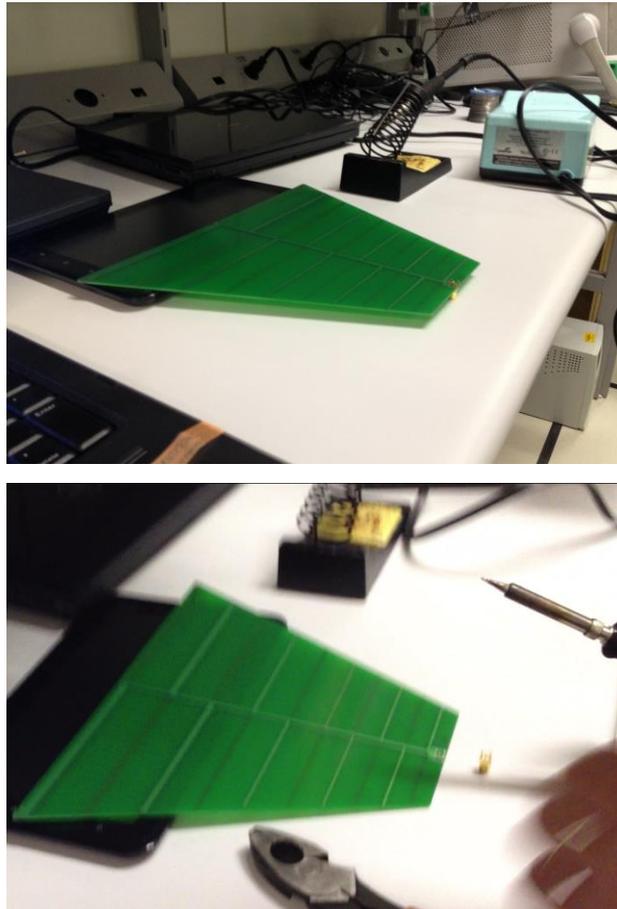


Fig. 107 Soldando o conector SMA na antena

A antena utilizada na USRP foi uma antena magnética omnidirecional [66] com ganho entre 3-4 dBi. Esta antena opera no intervalo de frequências de 698 MHz até 2.3 GHz.





Fig. 108 Antena Omnidirecional



Fig. 109 Antena Omnidirecional e o USRP

A antena apresentada na fig. 110 corresponde ao Sistema Interferente (LTE Femtocell -USRP) e foi montada em um mastro de altura aproximadamente igual a 2.10 metros. Esta altura foi apropriada para o cenário de medição, mantendo a linha de visada em relação ao Sistema vítima (SBTV D).

5.3.5.3.2. Antenas do SBTVD

A seguir são apresentadas as antenas utilizadas para a transmissão e recepção do sinal de TV digital de teste.

Para a **transmissão** do sinal de TV digital, foi utilizada a antena diretiva SBTVD-T/UHF [67], compatível com TV Digital.



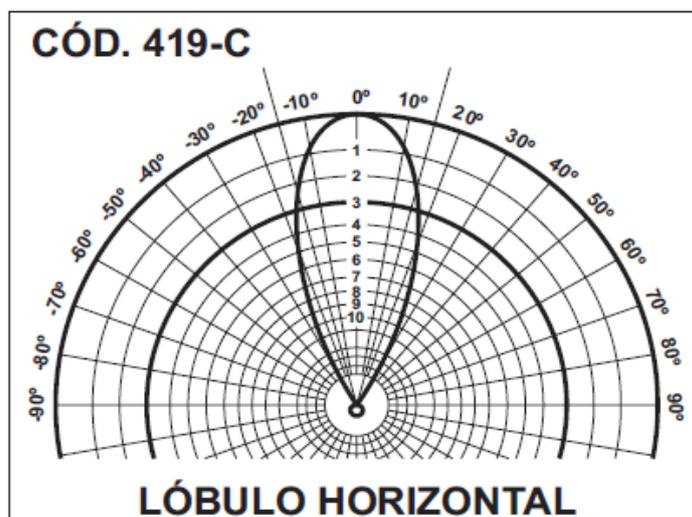


Fig. 110. Antena Diretiva 419C/419C1 e Diagrama de Irradiação

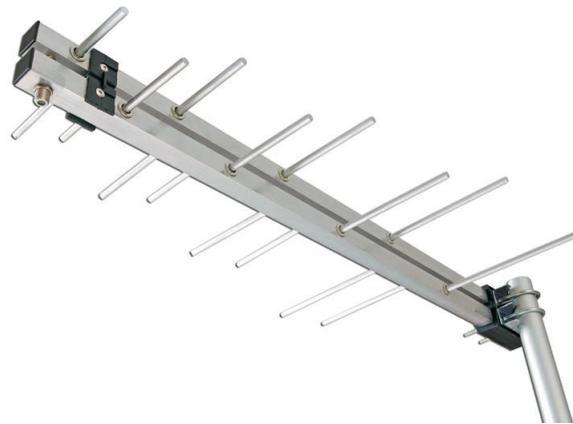
A antena apresentada na fig. 111 corresponde ao Sistema vítima (SBTVD) foi montada em um mastro de 2.05 metros com linha de visada ao receptor de TV digital operando a uma distância de aproximadamente 6 metros.

As características principais da antena diretiva 419C/419C1 são detalhadas a seguir [67]:

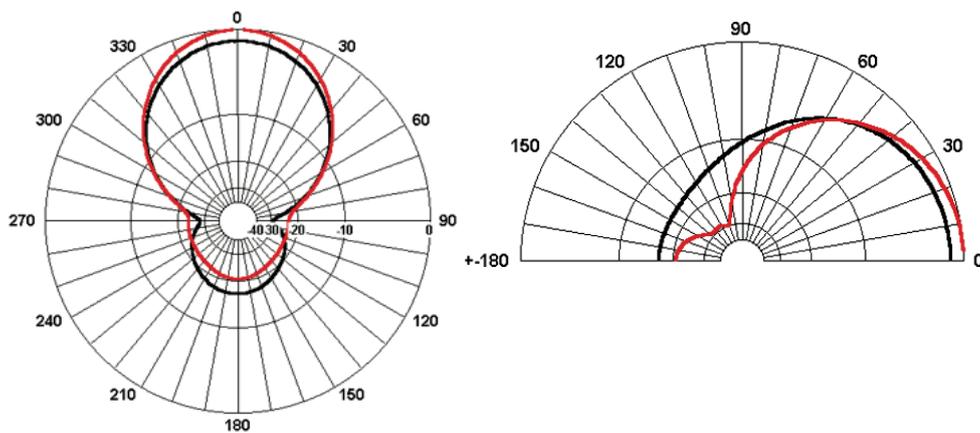
Tabela 29. Características Antena Diretiva

| Código | 419C/419C1 |
|-----------------------|---------------|
| Frequência | 580 à 890 MHz |
| Canais | 33 ao 83 |
| Relação frente costas | 29 dB |
| Ângulo Horizontal | 31° |
| Ângulo Vertical | 40° |
| Comprimento | 1.24 metros |
| Peso | 1.64 kg |
| Ganho | 14 dB |
| ROE | ≤ 1.2 |
| Impedância | 75 – 300 Ω |

Para a **recepção** do sinal de TV digital foi considerada a utilização da antena tipo Log Periódica UHF [68] de 8 elementos .



a) Antena Log Periodica



b) Azimute e Elevação

Fig. 111. a) Antena de Recepção b) Diagrama de Irradiação

A altura do mastro foi de 1.90 metros, mantendo a linha de visada em relação à posição do Transmissor de TV digital e da LTE Femtocell – USRP. As distâncias de separação variaram entre 2 e 25 metros aproximadamente.

A seguir são detalhadas as características técnicas da antena tipo Log Periódica [68] para a recepção de canais de TV bandas IV e V, correspondentes aos canais 14 a 69.

Tabela 30. Especificação Técnica da Antena Log Periódica

| | |
|------------------------------|---------------|
| Tipo | Log Periódica |
| Frequência | 470 – 806 MHz |
| Ganho | 8 dBi ± 1 dB |
| Relação Frente/Costas | 26 dB ± 2 dB |
| Peso | 550 gramos |
| Dimensões | 700 x 330 mm. |
| Conector | F (fêmea) |
| VSWR | < 1.5:1 |
| Impedância | 75 Ω |

Foi ainda utilizado um telêmetro laser modelo DLE 50 Professional para estabelecer com precisão as distâncias de separação entre o Sistema vítima (SBTVD) e o Sistema Interferente (LTE Femtocell - USRP).



Fig. 112 Telêmetro a Laser