

3

Setup de Medidas

Diversas são as técnicas de sondagem de canal existentes, e que basicamente se dividem em faixa estreita e faixa larga e a caracterização no domínio do tempo e no domínio da frequência. No *setup* usado neste trabalho foram utilizadas duas técnicas de sondagem a STDCC e OFDM, discutidas logo a seguir.

A transmissão é dita faixa estreita quando se transmite um tom e grandes alterações na amplitude e fase ocorrem devido ao multipercurso. Portanto, pode-se transmitir uma onda CW para sondar o canal e observar as variações na amplitude e fase do sinal recebido. Para caracterizar o canal temos que trabalhar também no domínio da frequência, pois o tom transmitido aparece como espalhamento Doppler. As medidas em faixa estreita podem ser feitas com um analisador de rede conforme mostra HOWARD [5].

A transmissão é dita faixa larga quando não é possível transmitir um tom, mas sim um sinal de teste com uma banda superior a banda de coerência do canal. Neste caso teríamos que caracterizar o canal através de sua resposta ao impulso, e para isto deve-se transmitir um impulso para observar o comportamento do canal na faixa. Numa das técnicas de sondagem em banda larga é feita uma varredura em frequência com vários tons, ou seja, procura-se através de várias medidas faixa estreita ter a característica banda larga do canal. Porém, o problema nesta técnica é manter o canal estacionário durante as medidas. Outra solução seria transmitir um trem de pulsos estreitos [2] e neste caso, o problema é que transmissores são limitados na potência de pico o que limita muito o alcance.

A técnica de compressão de pulsos chamada Varredura de Retardo de Tempo e Correlação Cruzada, conhecida pela sigla STDCC, é uma boa opção de sondagem, pois através de uma sequência pseudo-aleatória diretamente a resposta do canal conforme será visto adiante.

A técnica OFDM é opção para sondar um canal banda larga no domínio da frequência. A seguir, apresenta-se uma descrição sucinta destas duas técnicas de sondagem.

3.1 STDCC

A base da técnica de sondagem STDCC é sondar o canal através do ruído, usando para isso a propriedade da função de autocorrelação do ruído branco, $n(t)$. Portanto, deve-se sondar o canal e obter-se a resposta ao impulso do canal, $h(t)$. Assim, transmitindo $n(t)$, o sinal recebido seria

$$r(t) = h(t) * n(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(\xi)n(t - \xi)d\xi \quad (3.1)$$

Usando-se um correlator com $n(t-\tau)$, tem-se:

$$E[r(t)n^*(t - \tau)] = \int_{-\infty}^{+\infty} h(\xi)\mathfrak{R}_n(t - \xi)d\xi \quad (3.2)$$

O ruído, $n(t)$, é um processo estocástico gaussiano. Portanto, sua função de autocorrelação, $\mathfrak{R}_n(\tau)$, é impulsiva devido a sua característica de ser ruído branco. Logo:

$$E[r(t)n^*(t - \tau)] = N_o h(\tau) \quad (3.3)$$

onde N_o é a densidade espectral de potência de ruído.

O que se conclui da equação 3.3 é que quando usamos ruído branco para sondar o canal deve-se ter no receptor um correlator com gerador de ruído branco com um deslocamento temporal variável τ . Entretanto, isto é impossível de ser implementado e a solução seria buscar alguma seqüência determinística que tenha as propriedades do ruído branco. Tal solução é viável quando se usa uma seqüência binária pseudo-aleatória, denominada seqüência PN. A figura 3.1 ilustra a função de autocorrelação de uma seqüência PN.

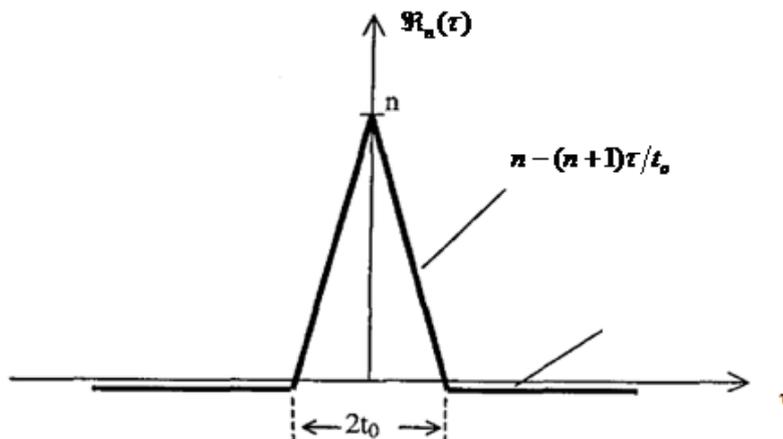


Figura 3.1 – Função de Autocorrelação da seqüência PN.

A técnica STDCC originalmente proposta por Cox [3] é aqui empregada usando o equipamento MG3700 da Anritsu. A seqüência PN foi gerada via *software* usando Matlab, e conversão da seqüência em sinal elétrico é feita por um *software* proprietário da Anritsu o IQPRODUCER. Um problema da seqüência PN é a faixa dinâmica e os lóbulos laterais, para melhorar o desempenho da mesma optou-se pelo uso de amplificador de potência e filtragem na seqüência antes de transmiti-la. A figura 3.2 ilustra duas seqüências uma filtrada e outra não filtrada.

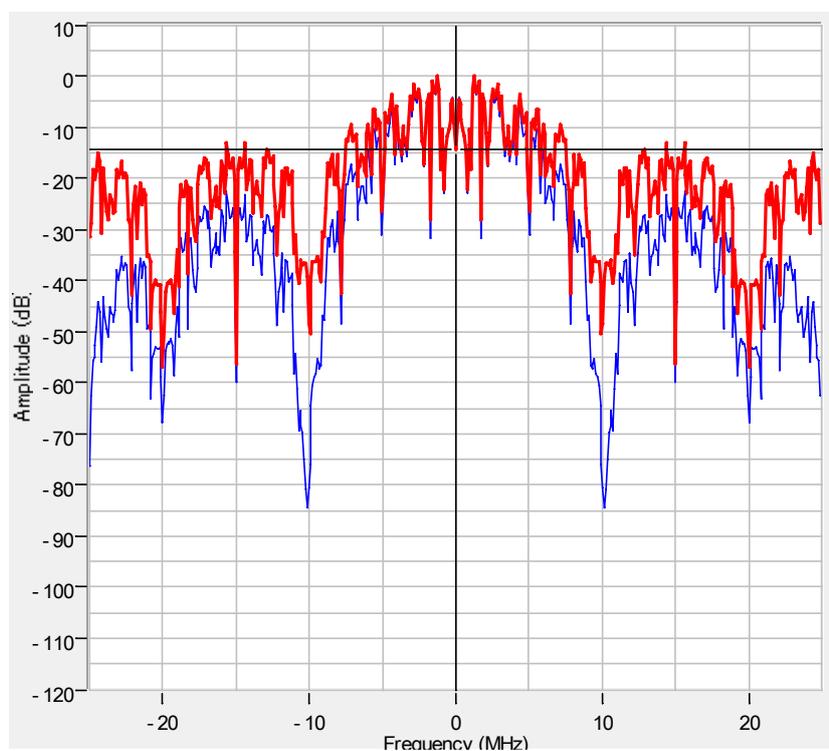


Figura 3.2 – Gráfico ilustrando seqüência filtrada (em azul) e não filtrada (em vermelho)

O grande motivador de do uso da faixa de 3,5 GHz a tecnologia WiMAX que ocupa a banda entre 3,4 GHz e 3,6 GHz. A sondagem foi feita em 3,5 GHz conforme ato N° 3786/2010 de autorização da ANATEL para uso temporário do espectro para fins científicos e experimentais. Primeiro foi feito uma varredura no local para poder se alocar a sondagem em uma banda livre. As figuras 3.3, 3.4, 3.5 e 3.6 ilustram os resultados da varredura nos quatro cantos da cobertura do prédio AG na Universidade Gama Filho, Campus Piedade de onde se conclui pouco uso do espectro nesta dada região.

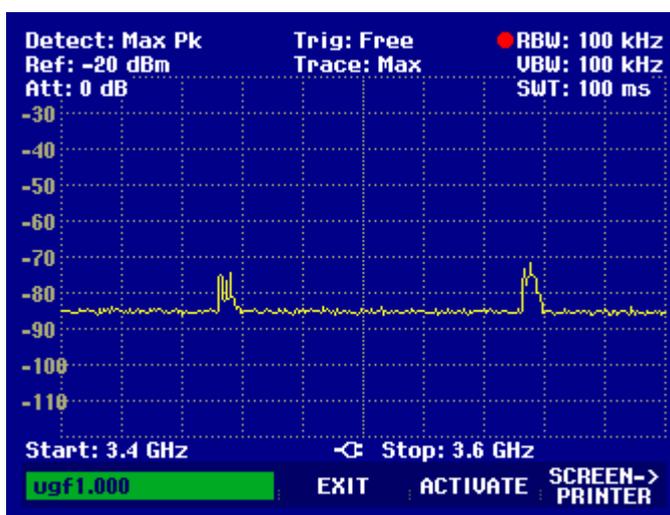


Figura 3.3 – Varredura em 3,5GHz



Figura 3.4 – Varredura em 3,5GHz



Figura 3.5 – Varredura em 3,5GHz

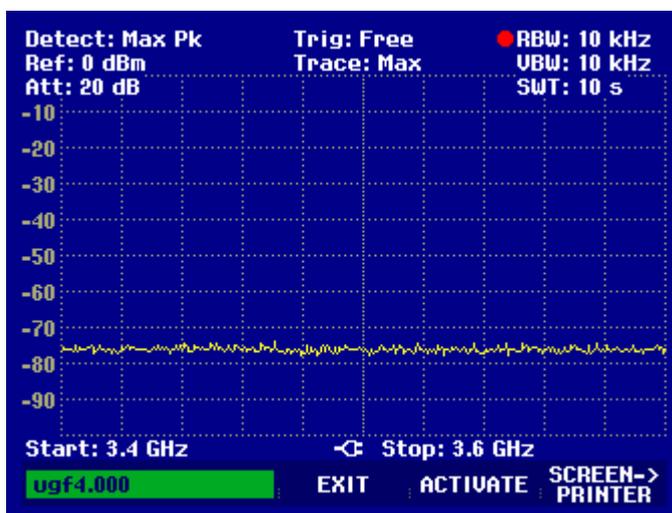


Figura 3.6 – Varredura em 3,5GHz

As características da seqüência PN utilizada são mostradas na tabela 3.1. A diferença de taxa entre transmissor e receptor é de 10KHz. Portanto, o fator de escala K é a razão entre esta diferença e a seqüência de maior taxa, logo $K=1000$.

Tabela 3.1

Especificações	Seq. PN Tx.	Seq. PN Rx.
Comprimento m	511 bits	511 bits
Duração (μ s)	0,1	0,1001
Amostras por bit (MSPS)	50	49,95
Intervalos de amostragem (ns)	20	20,02

Quando se usa a técnica STDCC deve se pensar nas limitações da sonda e por isto se torna necessário conhecê-las: faixa dinâmica, resolução em frequência, resolução de multipercurso, fator de escala e resolução de deslocamento Doppler.

3.1.1

Faixa Dinâmica

O grande objetivo aqui é conseguir detectar multipercurso, o problema é justamente a diferença entre a intensidade do sinal transmitido e o pulso oriundo de um espalhador, ou seja, refletido ou difratado. Para que isto ocorra, quando maior a faixa dinâmica melhor. A técnica STDCC usa uma seqüência PN para sondar o canal, e sua faixa dinâmica depende do tamanho da seqüência, tal que

$$FD = 20\log(m) \quad (3.4)$$

*Tx e Rx significam no transmissor e receptor, respectivamente.

Para o sistema em questão, sondagem com seqüência PN com $m=511$ bits, a faixa dinâmica ideal é 54 dB, mas observa-se que na prática observando a Figura 3.2, que usando filtragem para reduzir os lóbulos laterais consegue-se quase 25dB e se não houver filtragem tem-se 15 dB. Observa-se que quanto maior a seqüência PN maior a faixa dinâmica e que é preciso usar filtragem, ou corre-se o risco de não termos uma sonda eficiente.

3.1.2

Resolução em Frequência

A análise no domínio da frequência depende da capacidade de se distinguir as frequências, para assim pode-se ver o efeito da seletividade do canal. Portanto, a capacidade de se fazer essa distinção é definida pela resolução em frequência de acordo com a equação 3.5.

$$R_F = \frac{1}{mT_{bit}} \quad (3.5)$$

O sistema em questão com seqüência de tamanho de 511 bits e taxa de 10MHz impõe uma resolução em freqüência de 19,6 KHz. Logo, para melhorar a resolução tem-se que aumentar o tamanho da seqüência, o que também melhora a faixa dinâmica.

3.1.3

Resolução de multipercurso

A resolução do multipercurso determina quão próximo e quão distante consigo detectar o multipercurso. O retardo mínimo e máximo determinam estas resoluções e pode-se calcular conforme as equações 3.6 e 3.7.

$$\tau_{\min} = T_{bit} \quad (3.6)$$

$$\tau_{\max} = mT_{bit} \quad (3.7)$$

A sonda tem $\tau_{\min} = 0,1\mu s$ e $\tau_{\max} = 51,1\mu s$. Isto significa que a sonda é capaz de distinguir multipercursos com diferenças de até no mínimo 30m e não consegue distinguir diferenças superiores a 15 Km, aproximadamente. Portanto para o cenário escolhido é preciso considerar estas questões.

3.1.4

Fator de Escala

O fator de escala é uma medida da capacidade de espalhamento da seqüência adotada. O fator de escala é definido como a razão entre a maior taxa utilizada (f_{\max}) e a diferença de taxas (Δf) entre as seqüências PN transmitidas e recebidas conforme a equação 3.8.

$$k = \frac{f_{\max}}{\Delta f} \quad (3.8)$$

No caso específico, como é transmitido com uma frequência de 10 MHz e recebe-se um sinal a 9,99 MHz, o fator de escala é de 1000.

3.1.5

Resolução Doppler

Quando usa-se uma fonte em movimento e um receptor parado, o que vale também para esta situação, porque o transmissor fixo e o receptor em movimento, ocorre um desvio em frequência chamado deslocamento Doppler. No caso em questão a sondagem de canal é interessante para obter-se o Espalhamento Doppler, e saber o máximo deslocamento Doppler que se consegue medir com o nosso sistema. Para se conhecer o máximo Doppler, é preciso determinar a resolução Doppler, a qual é dada pela equação 3.9.

$$f_D = \frac{1}{2kmT_{bit}} \quad (3.9)$$

Para a seqüência PN que, usamos 10 MHz e 9,99 MHz, teremos deslocamento Doppler de $\pm 10Hz$, para isso basta usarmos a equação 3.9 para o cálculo. Para a sonda adotada tem-se uma velocidade de aproximadamente 3km/h. Logo, quanto maior a seqüência PN menor o Doppler medido, o que pode inviabilizar esta medida, e diminuir também a velocidade medida. No sistema adotado, não se mede o Doppler devido a baixa velocidade e, portanto só se tem a medida de multipercursos.

3.2

Sonda STDCC

Conforme a equação 2.1 a sonda SDTCC realiza a correlação com a seqüência PN gerada no receptor para obter-se o perfil de potência de retardos. Quando se correlaciona estes sinais tem-se um pico de correlação toda vez que as seqüências se sobrepuserem e, para que a compressão seja eficiente devemos ter a menor diferença entre as taxas transmitidas e recebidas, conforme a equação 3.8, quando menor esta diferença, maior será o fator de escala.

A seqüência PN utilizada foi de 511 bits com o polinômio gerador $x^9 + x^4 + 1$. O nosso sistema gerou o polinômio já filtrado via Matlab, e usamos o *software* proprietário da Anritsu IQProducer para transformar a seqüência PN gerada em um arquivo *.wvi em que o transmissor MG3700A (da Anritsu) reconhece e transmitimos para um amplificador de potência e para a antena conforme a figura 3.7



Figura 3.7 – Transmissor instalado na cobertura do prédio AG no Campus Piedade da Universidade Gama Filho

O amplificador de potência deve operar na região linear, e para isto devemos levantar a curva do amplificador. Portanto, para o caso de uma seqüência PN a linearidade pode ser obtida a partir das guras 3.8 e 3.9 . A figura 3.9 mostra claramente que a região linear do amplificador fica entre -70dBm e -10dBm.

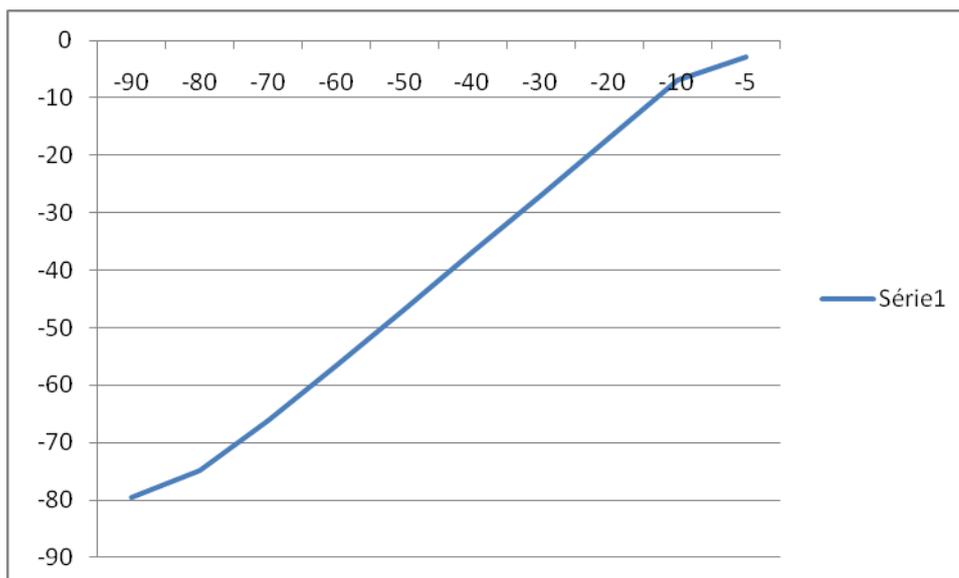


Figura 3.8 – Curva do resposta do amplificador de potência

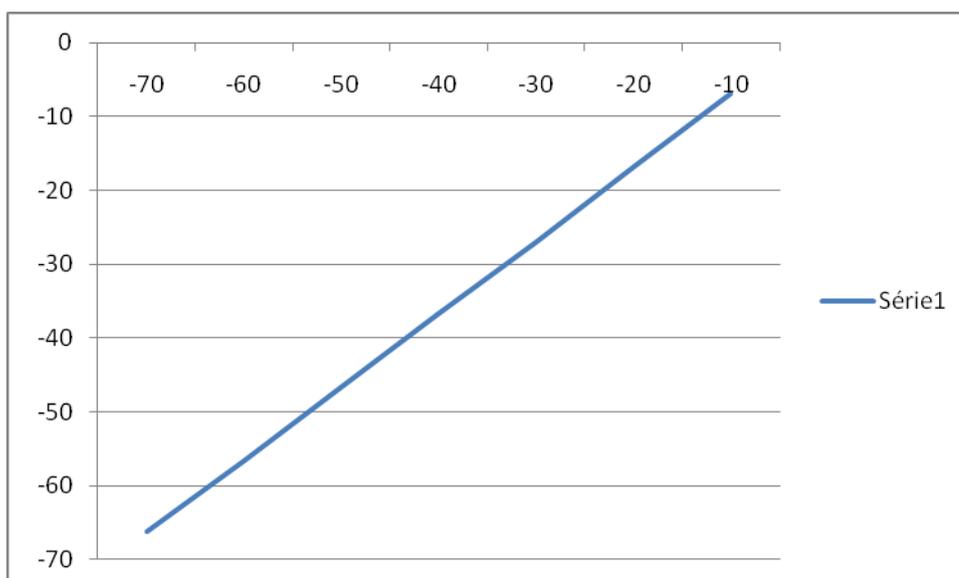


Figura 3.9 – Resposta do amplificador de potência na região linear

Conforme a equação 3.3, através da transmissão de ruído, tem-se a resposta do canal $h(t,\tau)$. Entretanto, pelo exposto anteriormente optou-se pela transmissão de uma seqüência PN. A figura 3.10 mostra um perfil obtido em visada após a correlação para obtenção do perfil do canal.

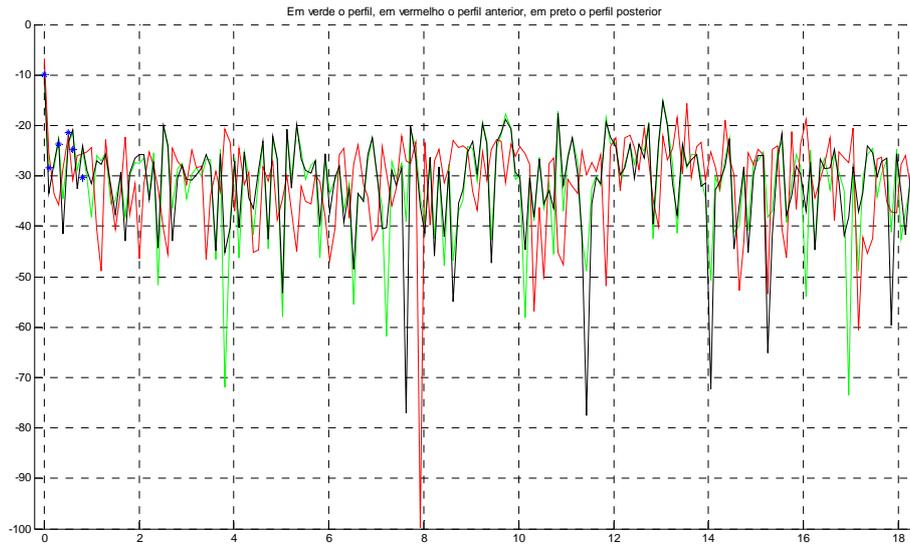


Figura 3.10 – Perfil em Visada

3.3

OFDM

O sinal OFDM é usado como técnica de sondagem de canal, e o mesmo é uma sondagem no domínio da frequência. A sondagem no domínio da frequência é uma tentativa de se medir uma função de transferência variante no tempo através de várias medidas faixa estreita, isto já foi proposto por Barros [15] para ambiente *Indoor* com a desvantagem ser feito uma varredura na banda requerida exigindo um perfeito sincronismo entre Tx e Rx, e além de termos de garantir que neste intervalo em que é feito a medição o canal seja estacionário.

As técnicas de sondagem em banda larga no domínio da frequência podem ser por varredura de um tom por meio de um analisador vetorial de redes, com o inconveniente acima já citado da estacionariedade. Outra possível técnica de sondagem seria a multi-tom conforme MARUM[16] usando OFDM.

Um sinal OFDM consiste em se transmitir em banda larga com vários canais faixa estreita, conforme mostra a equação abaixo,

$$s(t) = \Re e \left[\sum_{i=0}^{N_s-1} d_i e^{+j2\pi \frac{i}{T}(t-T_s)} \right], t_s \leq t \leq t_s + T \quad (3.10a)$$

$$s(t) = 0, t_s + T \leq t \leq t_s \quad (3.10b)$$

A equação 3.10 ilustra a geração das subportadoras que são ortogonais e que levam a uma planicidade espectral à medida que se aumenta o número de subportadoras, conforme na Figura 3.11. Cabe ressaltar que na transmissão é feita uma transformada inversa de Fourier e na recepção uma transformada de Fourier, o que é ilustrado nas Figuras 3.12 e 3.13.

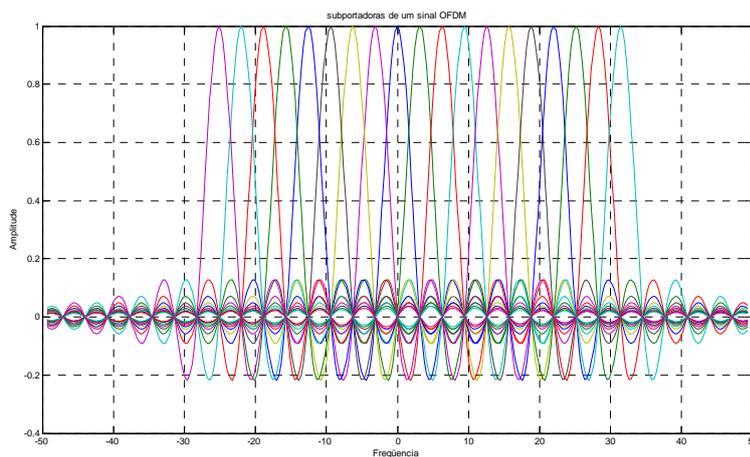


Figura 3.11 – Subportadoras de um Sinal OFDM

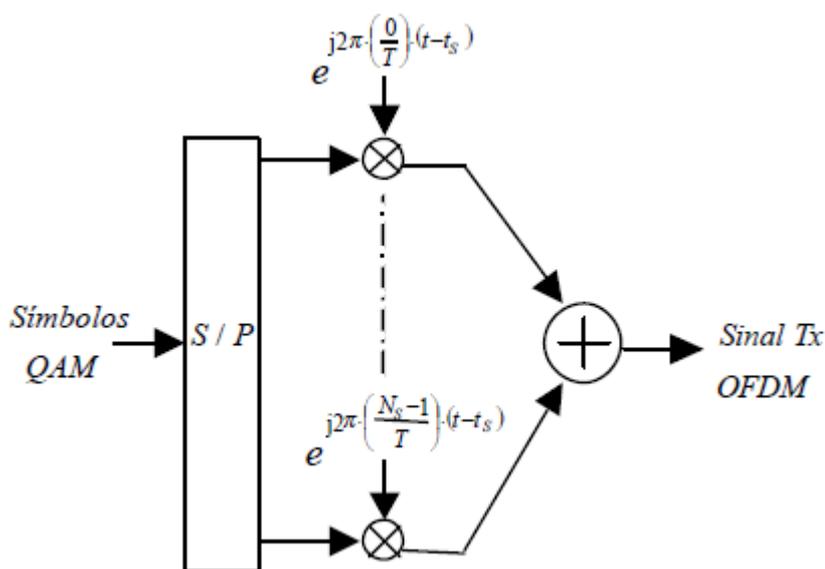


Figura 3.12 – Transmissão de um sinal OFDM

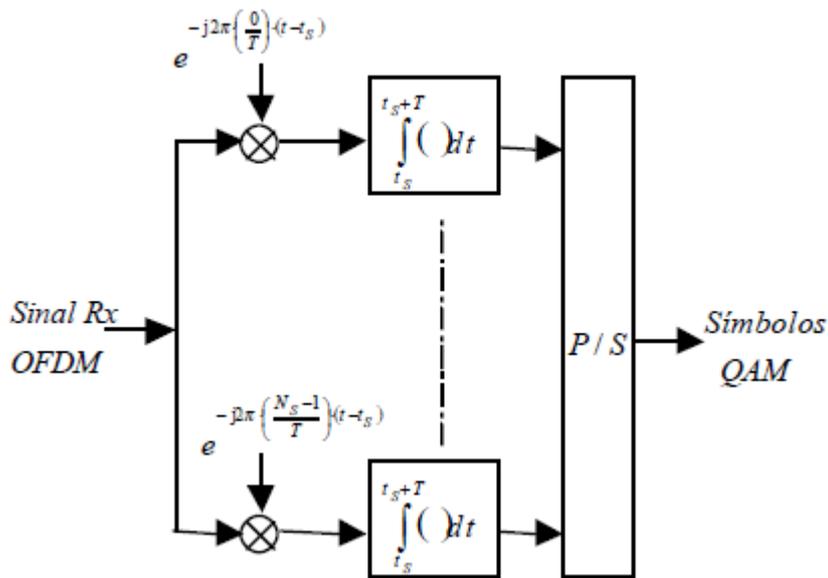


Figura 3.13 – Recepção de um sinal OFDM

OFDM não é somente transformada de Fourier, porque é preciso transformar o sinal analógico em digital através de um conversor D/A, tem-se a inserção de um intervalo de guarda. Entretanto o objetivo não é melhorar o desempenho de um dado sistema, mas sim usar OFDM para sondar o canal. Por isto é necessário usar o menor intervalo de guarda para capturar o máximo de multipercurso possível. As figuras 3.14 e 3.15 ilustram como deve ser o mapeamento em OFDM.

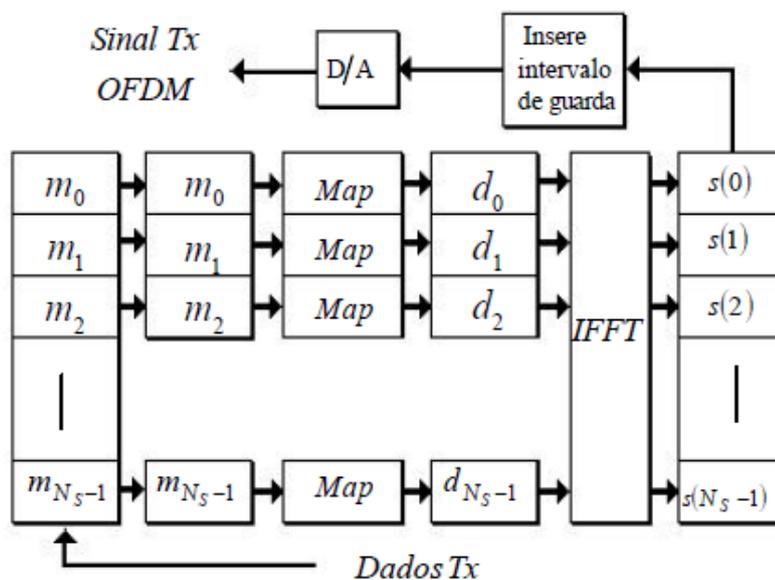


Figura 3.14 – Mapeamento para transmissão de um sinal OFDM

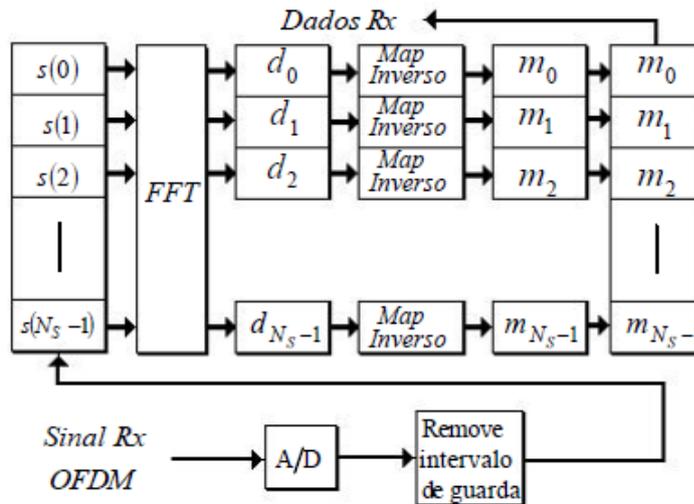


Figura 3.15 – Mapeamento para recepção de um sinal OFDM

A equação 3.10 ilustra como deve ser a escolha do sinal OFDM, mas a equação 3.11 mostra claramente e em detalhes quais os diversos parâmetros a serem escolhidos de acordo com MARUM [16].

$$s(t) = \Re e \left[\left[\sum_{i=-K/2}^{+K/2} c_{ml,k} e^{+j2\pi \frac{k}{T_U}(t-t_s)} \right] e^{j\pi f_c(t-t_s)} \right], t_s \leq t \leq t_s + T_U \quad (3.11a)$$

$$s(t) = 0, t < t_s & t > t_s + T_U \quad (3.11b)$$

onde:

- T período elementar
- N número de subportadoras FFT/IFFT
- $T_U = N \cdot T$ período útil do símbolo OFDM
- G número de subportadoras OFDM na banda de guarda
- $\Delta = G \cdot T$ período da banda de guarda
- $T_S = T_U + \Delta$ período do símbolo OFDM
- T_{NULL} período de símbolos nulos
- L número de símbolos OFDM em um quadro
- $T_F = L T_S + T_{NULL}$ duração de um quadro
- f_c portadora de RF
- m número do quadro

- l número do símbolo OFDM
k número da subportadora

A técnica OFDM originalmente proposta por Marun [16] é aqui empregada usando o equipamento MG3700 da Anritsu. O sinal OFDM foi gerado via software Matlab, a conversão da seqüência em sinal elétrico é feita pelo software proprietário da Anritsu o IQPRODUCER. Uma grande vantagem em se usar OFDM é a faixa dinâmica que melhora o desempenho da mesma. A Figura 3.16 ilustra o sinal OFDM e a Figura 3.17 uma comparação entre OFDM, PN filtrada e PN não filtrada.

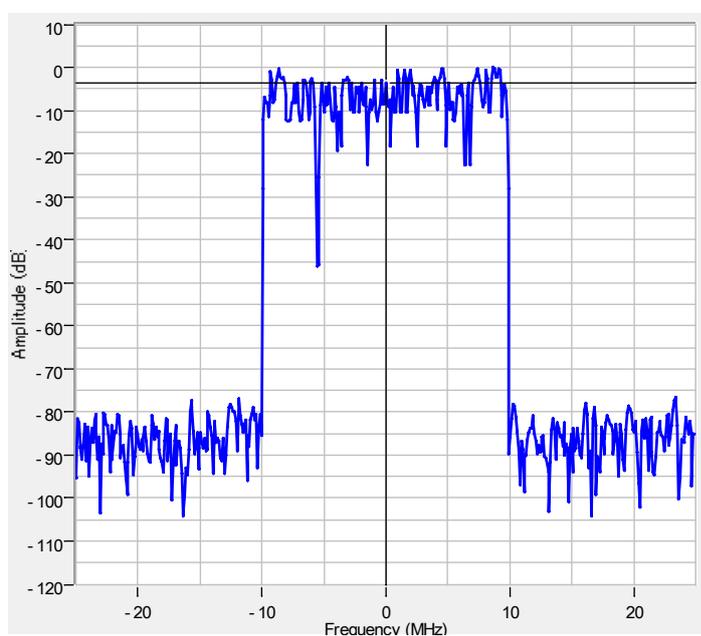


Figura 3.16 – Gráfico ilustrando o sinal OFDM

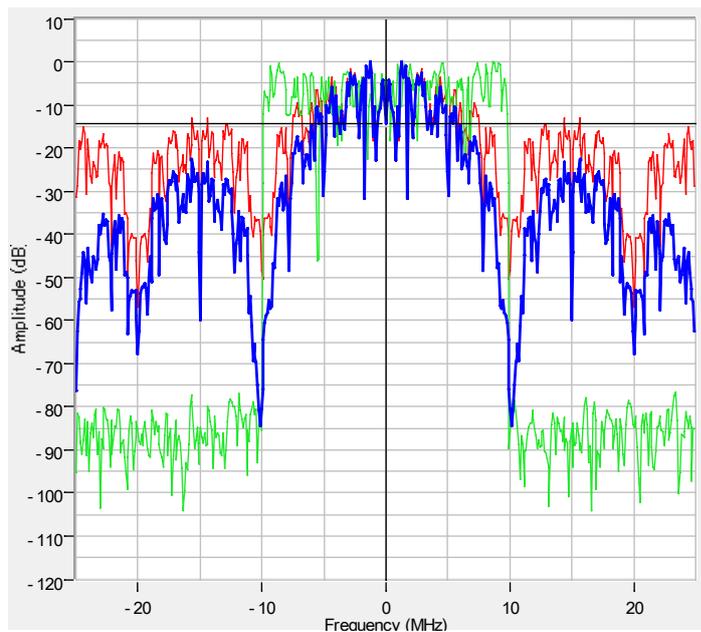


Figura 3.17 – Gráfico ilustrando seqüência filtrada (em azul) , seqüência não filtrada (em vermelho) e sinal OFDM (em verde)

O sinal OFDM ilustrado na Figura 3.16 foi o sinal enviado na sondagem aqui usada, mas antes de enviá-lo foi realizada uma varredura conforme mostra as figuras 3.3, 3.4, 3.5 e 3.6.

3.3.1

Faixa Dinâmica

A faixa dinâmica depende do tamanho da FFT e é determinada por

$$FD = 20\log(N) \quad (3.12a)$$

A faixa dinâmica vem dos pontos não nulos, porém o sinal OFDM tem pontos nulos, a faixa dinâmica é degradada e dada pela equação 3.12b.

$$FD = 20\log(N_{used}) \quad (3.12b)$$

3.3.2

Resolução em Frequência

A análise no domínio da frequência depende da capacidade de se distinguir as frequências, para assim ver o efeito da seletividade do canal. Portanto, a capacidade de se fazer essa distinção é definida pela resolução dada por

$$R_F = \frac{1}{NT_S} \quad (3.13)$$

O sistema tem uma banda de 10 MHz que nos impõe uma resolução em frequência de 19,53 KHz, uma vez que temos uma dimensão de 512 subportadoras. Logo, para melhorar a resolução em frequência é necessário aumentar o tamanho da seqüência, o que também melhora a faixa dinâmica.

3.3.3

Resolução de multipercurso

A resolução de multipercurso é dada pela resolução mínima e máxima, respectivamente:

$$\tau_{\min} = \frac{1}{B} \quad (3.14)$$

$$\tau_{\max} = T_S \quad (3.15)$$

Assim, verificamos que as equações dependem da banda e do tamanho do símbolo OFDM, no nosso caso 0,1 μ s e 51,2 μ s, respectivamente. Entretanto, verifica-se que é possível aumentar a resolução com o aumento do espaço da FFT.

3.4

Sonda OFDM

A sonda OFDM usa o princípio da ortogonalidade das subportadoras e o uso de um prefixo cíclico. Neste caso usa-se a correlação para sincronizar o sinal OFDM transmitido com o usado na calibração. Posteriormente, são realizadas as transformadas de Fourier e obtêm-se através da razão das transformadas de Fourier do sinal recebido com o de calibração obtemos a resposta em frequência do canal e após uma transformada inversa de Fourier obtêm-se a resposta do canal.

De maneira análoga a sonda STDCC, montamos o setup alterando apenas o sinal carregado no transmissor. Portanto, a Figura 3.7 também ilustra o setup da sonda OFDM. Com relação ao amplificador de potência deve operar na região linear, e para isto deve-se levantar a curva do amplificador. Entretanto tem-se uma pequena alteração na curva quando usamos OFDM em vez de seqüência PN por exemplo. Portanto, para o caso de se usar um sinal OFDM temos a Figuras 3.18. A Figura 3.18 nos mostra claramente que a região linear do amplificador também fica entre -70dBm e -10dBm.

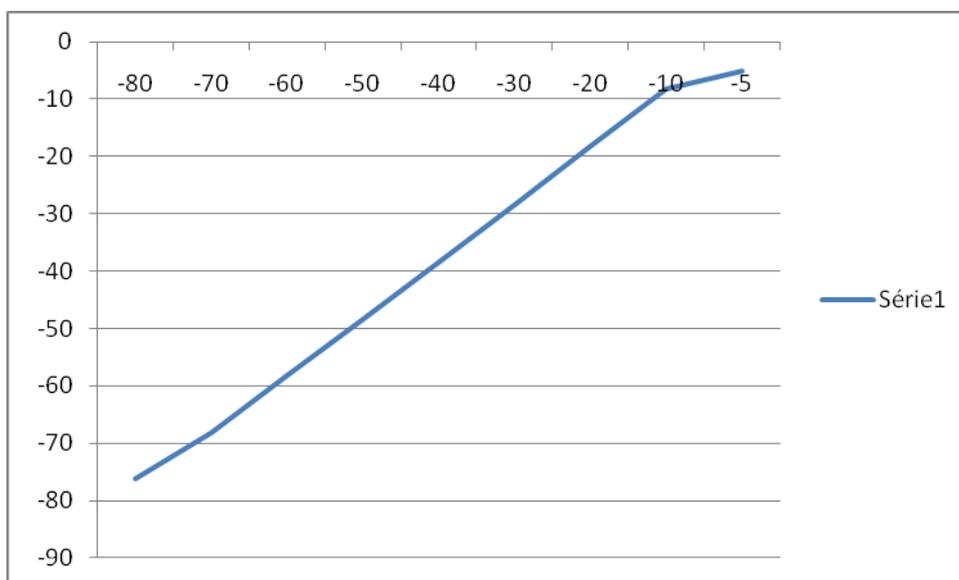


Figura 3.18 – Curva do resposta do amplificador de potência

As Figuras 3.2 e 3.17 mostram o espectro dos sinais transmitidos, PN e OFDM, onde se observa que OFDM oferece uma resolução melhor. Outro aspecto importante que deve-se salientar é que as curvas levantadas para o amplificador

tem uma pequena diferença, quando transmitimos a seqüência PN tem-se um ponto de quebra entre -70 dB e -10 dB, o que não ocorre em OFDM o qual se situa entre -80 dB e -10 dB conforme as Figuras 3.8 e 3.18. Portanto, devido a restrição da Figura 3.8, caso PN, é preciso considerar a faixa de operação do amplificador entre -70 dB e -10dB, e não entre -80 dB e -10dB, comparado a OFDM. Portanto, opta-se por atender o caso mais restritivo que é o da sonda STDCC, no caso entre -70 dB e - 10 dB reduzindo-se um pouco a cobertura.