

# Hands-on 8

Transmissor/Receptor WBFM em 2,4GHz (GRC)

## Introdução Teórica

A teoria sobre FM para este exercício pode ser encontrada no hands-on 6.

### **Amostragem de sinais em banda-base**

Sinais (em banda base ou banda passante) são amostrados usando a taxa de amostragem determinada pela teoria de Nyquist. Em 1928, ele provou que

*“Seja um sinal  $s(t)$  limitado em frequência, tal que  $S(f) = 0$  para  $w > w_m$ , então  $s(t)$  é unicamente determinado por suas amostras  $s[nT]$ , com  $n=0, \pm 1, \pm 2, \dots$ , se:*

$$\omega_s \geq 2\omega_m$$

com

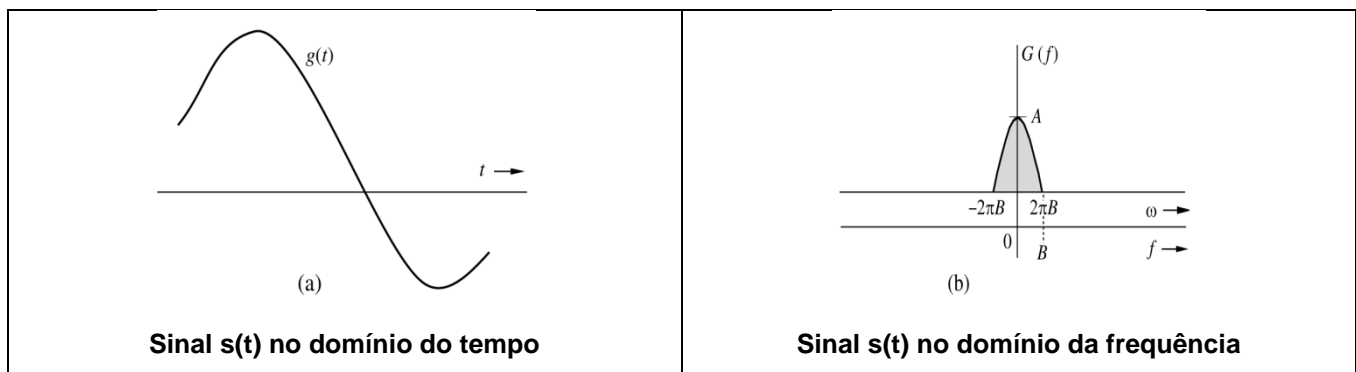
$$\omega_s = \frac{2\pi}{T_s}$$

O parâmetro  $T_s$  é conhecido como tempo de amostragem (seu inverso com taxa de amostragem), i.e., o tempo no qual se deve colher amostras igualmente espaçadas do sinal.

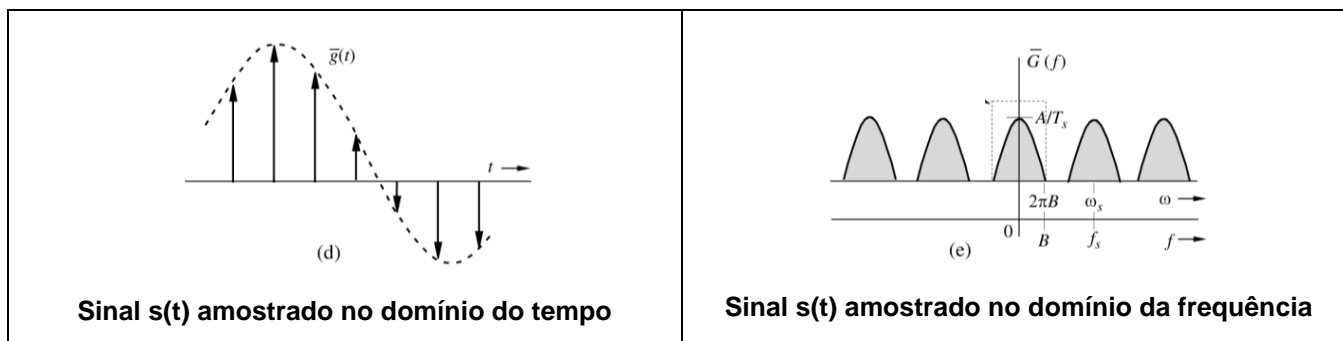
Assim, de acordo com o Teorema de Nyquist, a quantidade de amostras por unidade de tempo de um sinal, chamada taxa ou frequência de amostragem, deve ser maior que o dobro da maior frequência contida no sinal a ser amostrado, para que o mesmo possa ser reproduzido integralmente sem erro.

O erro decorrente de uma amostragem com taxa menor que a de Nyquist é chamado de aliasing (mascaramento). As figuras abaixo ilustram esse efeito.

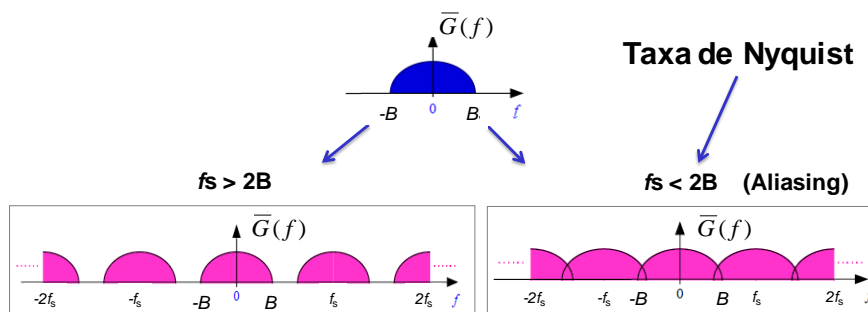
Suponha um sinal  $s(t)$  limitado em frequência como ilustrado na figura a seguir.



Ao amostrar o sinal  $s(t)$ , seu espectro é replicado como ilustrado na figura a seguir.



Assim, o aliasing ocorre devido a sobreposição espectral das réplicas do sinal amostrado, caso a frequência de amostragem não for escolhida apropriadamente, como ilustrado na figura a seguir.



Contudo, isso é perfeito para sinais em banda-base que tem espectro que se estende a algumas centenas que kHz. Considerando o processamento em SDR e de sinais em banda-passante com frequência de algumas centenas de MHz, o processamento do sinal amostrado utilizando a taxa de Nyquist (duas vezes a maior frequência do sinal) pode causar problemas de processamento e/ou gasto excessivo de bateria de terminais portáteis. Na verdade, amostrar sinais de 2,4 GHz utilizando a taxa de Nyquist já inviabiliza experimentos usando a USRP, até mesmo devido a limitações do próprio hardware. Dessa forma, lançamos mão da teoria de amostragem de sinais em banda-passante para evitar a aliasing, mesmo amostrando sinais de alta frequência a uma taxa de amostragem menor que a de Nyquist.

### Amostragem de Sinais em Banda Passante

Uma Alternativa para realizar a amostragem com taxa menor que a de Nyquist é incluir múltiplos estágios de translação de frequência, levando a um gasto indesejado com hardware entre a antena e o ADC. Outra alternativa é a utilização de amostragem em banda-passante (*bandpass sampling*). Amostragem em banda-passante é um a forma especial de sub-amostragem que translada um sinal em banda-passante de alta frequência (ou um sinal com múltiplas bandas) em um sinal em banda-base. A taxa de amostragem necessária passa a depender mais da banda do sinal do que da sua frequência máxima.

Da teoria da amostragem de sinais em banda-passante, um sinal em alta frequência e limitado em banda pode ser exatamente reconstruído se a taxa de amostragem  $f_s$  satisfaz as seguintes condições:

1. O limite inferior de frequência ( $f_L$ ) do sinal em banda-passante é menor que um múltiplo da metade do valor da taxa de amostragem, i.e.,

$$\frac{(n-1)f_s}{2} < f_L$$

2. Limite superior de frequência ( $f_H$ ) do sinal em banda-passante é menor que um múltiplo da metade do valor da taxa de amostragem, i.e.,

$$f_H > \frac{nf_s}{2}$$

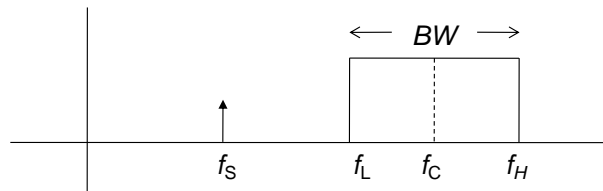
Rearranjando as duas condições acima, temos:

$$\frac{2f_H}{n} \leq f_s \leq \frac{2f_L}{n-1}$$

sendo:

- $f_L$  o limite inferior de frequência do sinal em banda-passante;
- $f_H$  o limite superior de frequência do sinal em banda-passante;
- $n$  um inteiro entre 1 e  $f_H/BW$ .
- $BW$  é a banda do sinal em banda-passante ( $f_H - f_L$ )

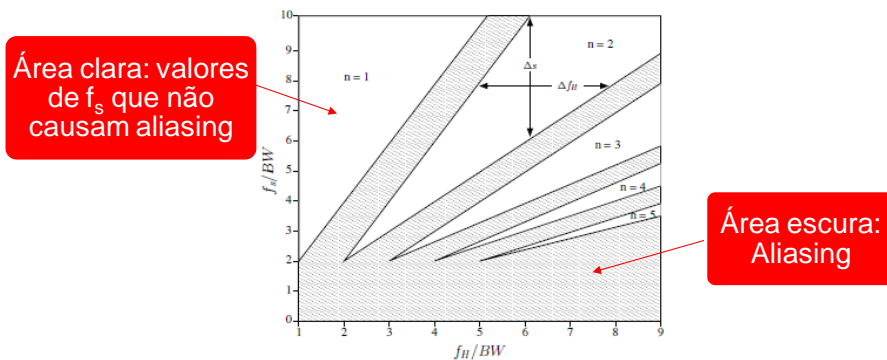
Tais parâmetros são ilustrados na figura a seguir.



Assim, o maior valor para  $n$  é:

$$n_{max} = \lfloor \frac{f_H}{f_H - f_L} \rfloor$$

As duas expressões podem ser expressas graficamente, normalizando a frequência de amostragem e a maior componente espectral do sinal em questão, gerando o gráfico a seguir. Ele mostra que dependendo do valor de  $n$  (menor a taxa de amostragem), menor é a região propícia a evitar o aliasing. Isso é facilmente observado pela expressão de  $f_s$ . Quanto maior o valor de  $n$ , menor é a diferença entre os limites inferiores e superiores de  $f_s$ .



Alguns autores propuseram algoritmos para calcular os valores ótimos de frequência de amostragem de sinais em banda-passante. Os algoritmos consistem basicamente na resolução das equações que regem a teoria da amostragem banda-passante, mas a degradação da SNR é um fator importante que merece ser levado em conta. Uma solução é estabelecer um nível de degradação, e a partir daí calcular a frequência de amostragem que satisfaça as condições.

## Referências

[1] <http://www.snowymtn.ca/GNURadio/GNURadioDoc-7.pdf> - acesso em: 04/12/2012

[2] A. Latiri. *Architecture et conception de récepteur reconfigurable à échantillonnage RF pour les applications multistandard*. PhD thesis, Telecom ParisTech, July 2008.

[3] R.G. Vaughan, N.L. Scott, and D.R. White. *The theory of bandpass sampling*. Signal Processing, IEEE Transactions 39(9):1973–1984, Sept. 1991.

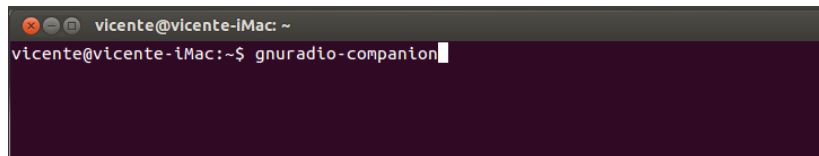
[4] Angrisani, L. D'Arco, M. Schiano Lo Moriello, R. & Vadursi, M. (2004). *Optimal sampling strategies for bandpass measurement signals*, Proc. of the IMEKO TC-4 Interational Symposium on Measurements for Research and Industry Applications. pp. 343-348, September 2004.

[5] J. Bae, J. Park. *An efficient algorithm for bandpass sampling of multiple RF signals*. Signal Processing, IEEE Letters 13(4):193- 196, April 2006.

## Exercício

**OBJETIVO:** Através do uso de conceitos sobre modulação em frequência (FM) e da teoria de modulação em banda-passante, iremos criar um transmissor FM capaz de transmitir em 2,4 GHz. Para tal precisaremos usar blocos de sub- e sobre-amostragem.

1. Caso ainda não esteja aberto, inicialize o GNU Radio Companion.
  - a. Abra um terminal digitando CTRL+ALT+t
  - b. Digite: gnuradio-companion e pressione ENTER

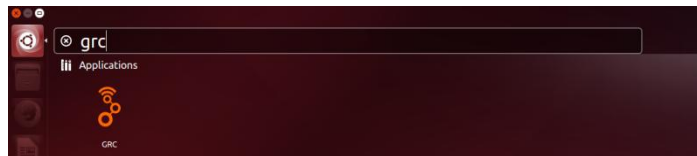


Alternativa:

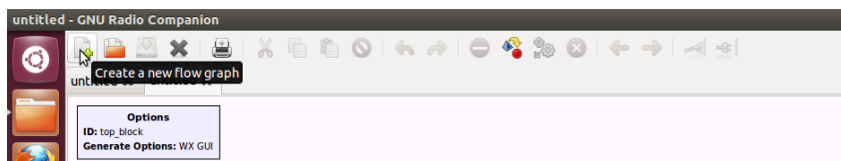
- a. Clique em Dash Home



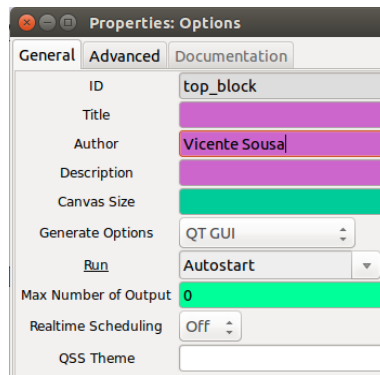
- b. Digite gnuradio e clique no ícone correspondente ao GRC



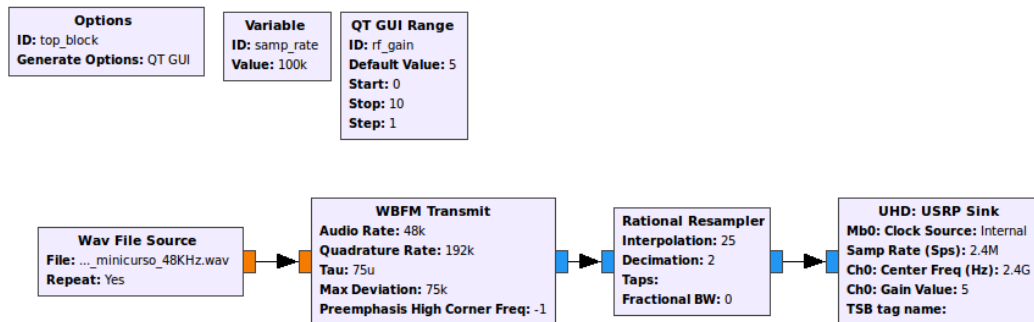
2. Com o GNU RADIO COMPANION aberto, crie um novo projeto



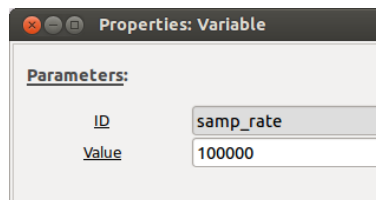
1. Clique duas vezes no Bloco **Options**. Esse bloco configura alguns parâmetros gerais de flowgraph. Mantenha o ID como top\_block. Digite um título para o projeto e um autor. Selecione *GenerateOptions* com QT GUI, *Run* para Autostart e *Realtime Scheduling* para Off. Então, feche a janela de propriedades.



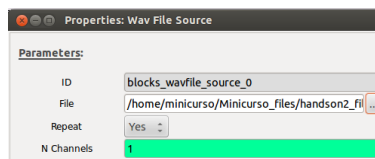
3. Primeiro iremos construir o transmissor, para só depois construirmos o receptor. Construa um projeto utilizando os blocos **Wav File Source**, **WBFM Transmit**, **Rational Resampler**, **QT GUI RANGE** e **UHD: USRP Sink**. Conecte os elementos de forma que sua área de trabalho fique igual à figura a seguir. Altere o campo *Type* para *Complex* apenas do bloco **Rational Resampler** que estará ligado à saída do bloco **WBFM Transmit**.



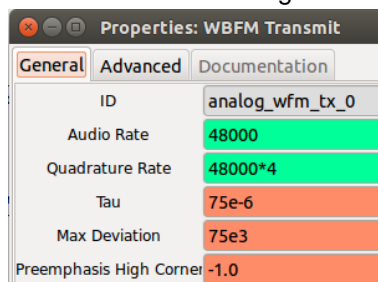
4. Configure o bloco **Variable** com o valor de *samp\_rate* para 100000 amostras. Esse valor foi escolhido como razoável para evitar grande complexidade e permitir que o experimento funcione na maioria dos computadores. Também é um valor bom o bastante para que todos os filtros possam ser realizáveis. O bloco deve ficar como na figura a seguir.



5. Configure o bloco **Wav File Source** com um arquivo **wav** para transmitir, procure um arquivo com taxa de 48 kHz. O bloco deve ficar como na figura a seguir.



6. Agora vamos configurar o bloco **WBFM Transmit**. Altere o campo *Audio Rate* para taxa de amostragem do arquivo de som, que por padrão deve ser 48000. O campo *Quadrature Rate* está diretamente ligado ao campo *Audio Rate*, no qual só é permitido colocar valores múltiplos do valor que está no campo *Audio Rate*. No nosso caso colocaremos 192000 que é um valor 4 vezes maior que 48000. Se por acaso você colocar um valor muito grande na variável *Quadrature Rate* poderá dar problemas, pois esse bloco usa filtros de *Chebyshev* e usa o algoritmo de Remez para concebê-los. Assim, se o valor for muito grande, a aproximação de Remez gerará um filtro com muitos estágios e de muita complexidade para o computador. O campo *Tau* e *Max Deviation* deixaremos o valor padrão. O *Tau* remete ao valor da constante de tempo de um circuito RC, enquanto o *Max Deviation* é a frequência máxima de desvio determinada pela Agência reguladora (ANATEL) que é de 75 kHz. O bloco deve ficar como na figura a seguir.



7. Dê dois cliques no bloco **UHD: USRP Sink** e altere o campo *Ch0:Center Freq* para a frequência que deseja alocar a transmissão. No nosso caso, optaremos pela frequência de 2,4GHz. Agora altere o campo *Ch0:Gain(dB)* que é o valor de ganho da antena para *rf\_gain*. Finalmente, alteraremos o campo *Samp Rate (Sps)* para o valor da taxa de amostragem que encontraremos seguindo o teorema da amostragem em banda-passante. Os próximos passos mostram como fazer esse cálculo.
- a. O sinal em banda-passante, com sua maior frequência sendo  $f_H$  e sua menor frequência  $f_L$ , pode ser completamente reconstruído (sem aliasing) se a taxa de amostragem  $f_s$  satisfizer as seguintes condições:

$$\frac{(n-1)f_s}{2} < f_L \quad \text{e} \quad f_H < \frac{nf_s}{2}$$

com  $n$  inteiro entre 1 e  $\frac{f_H}{f_H - f_L}$ . Isolando  $f_s$ , temos:

$$\frac{2f_H}{n} \leq f_s \leq \frac{2f_L}{n-1}$$

- b. Então, o maior valor para  $n$  é

$$n_{max} = \left\lfloor \frac{f_H}{f_H - f_L} \right\rfloor$$

- c. Para o nosso caso, temos que a frequência da portadora é 2,4GHz, o valor de  $\beta$  (índice de modulação) é 5 e o sinal de entrada será limitado em 15 kHz ( $W_m$ ). Portanto, o desvio máximo de frequência é de  $\Delta_f = 75$  KHz (similar ao estabelecido pela ANATEL para rádio FM comercial).
- d. E sabemos, pela regra de Carson, que a banda do sinal FM é  $BW = 2(W_m + \Delta_f) = 2(75 + 15) = 180$  kHz.



- e. Assim, temos que  $f_H = 2400000000 + 90000$  Hz. Da mesma forma que  $f_L = 2400000000 - 90000$  Hz. Assim temos:

$$n_{\max} = \left\lfloor \frac{2400000000 + 90000}{180000} \right\rfloor = 13333$$

$$\frac{2 * (2400000000 + 90000)}{13333} \leq f_{s\_minima} \leq \frac{2 * (2400000000 - 90000)}{13333 - 1}$$

$$360022,5005\text{Hz} \leq f_{s\_minima} \leq 360022,5022\text{Hz}$$

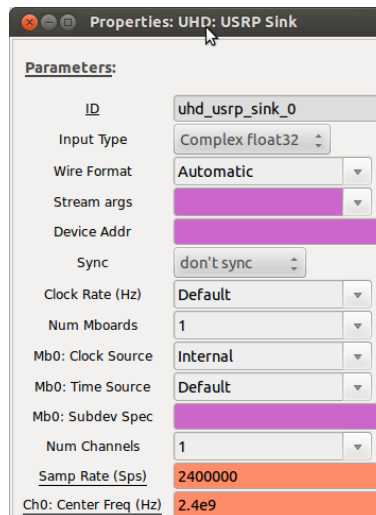
- f. Assim, podemos verificar que é possível amostrar um sinal de 2,4GHz com a taxa de amostragem de 360 kHz. O que é incrível, dado as dimensões!!! Contudo, o cálculo acima mostra que a taxa de amostragem só pode variar de 360022,5005 a 360022,5022Hz Hz, o que nos dá uma variação muito pequena de 0,0017 Hz!!! Muito fácil de ficar fora da margem de precisão de um equipamento SDR.
- g. Então, em vez de usarmos o  $n$  igual a  $n_{\max}$  (i.e. 13333), iremos usar 2000 como valor para  $n$  (escolhido arbitrariamente). Assim teremos uma taxa de amostragem mais alta, porém, teremos uma taxa que admite maior variação.
- h. Refazendo as contas para  $n$  igual a 2000, temos que:

$$\frac{2 * (2400000000 + 90000)}{2000} \leq f_s \leq \frac{2 * (2400000000 - 90000)}{2000 - 1}$$

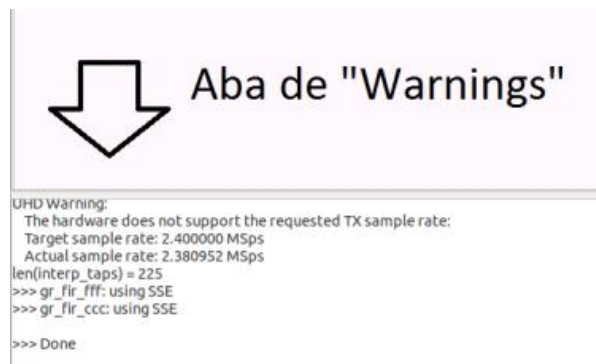
$$2400090\text{Hz} \leq f_s \leq 2401110$$

a taxa de amostragem pode variar de 2400090 a 2401110 Hz. Dando assim uma margem de variação da taxa de amostragem de 1020 Hz. Então, usaremos a taxa de amostragem de 2,4 Msps, que é muito próximo à frequência mínima de amostragem. Como veremos mais a frente, fatalmente teremos que mudar esse valor para um mais próximo que a USRP aceita.

- i. A configuração final do bloco ficará como mostrado na figura a seguir.



8. Contudo, isso não é tudo. Ao executar o projeto, receberemos a seguinte mensagem de *warning*.



9. Isso significa que, mesmo que configuremos a taxa de amostragem de 2,4 Msps, o hardware USRP não consegue fornecer exatamente essa taxa. Isso depende de fatores construtivos de cada SDR, e no caso da nossa USRP N210, a taxa disponível mais próxima de 2,4 Msps é 2,380952 Msps. Verifique que em “*Target sample rate*” estará o valor que escolhemos como *samp\_rate* no bloco **UHD USRP SINK**. O “*Actual sample rate*” é o valor mais próximo que o USRP chega do valor configurado no parâmetro *samp rate*.
10. Contudo esse valor novo da taxa de amostragem pode ser testado para se concluir se pertence a alguma faixa de valores aceitáveis de  $f_s$ , isto é, o valor de  $n$  não ultrapasse  $n_{\max}$ . Assim, temos:

$$\frac{2fH}{n} \leq fs \leq \frac{2fL}{n-1}$$

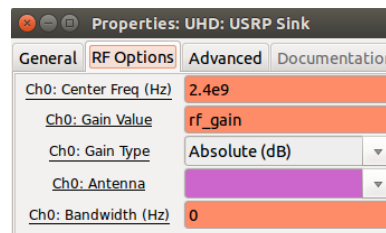
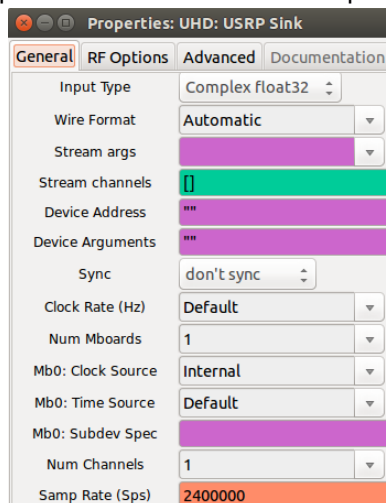
$$\frac{2 * (2400000000 + 90000)}{n} \leq 2380952 \leq \frac{2 * (2400000000 - 90000)}{n-1}$$

APROXIMADAMENTE:

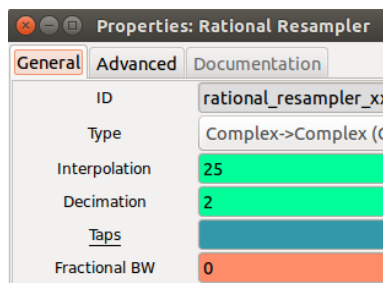
$$n \leq 2017$$

$$n \geq 2016$$

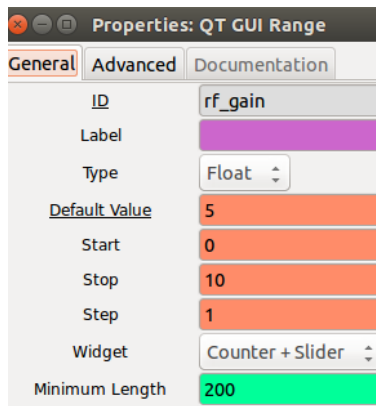
Assim podemos concluir que esse valor da taxa de amostragem está contido em uma faixa de valores possíveis. Que nesse caso é para um  $n = 2017$ .



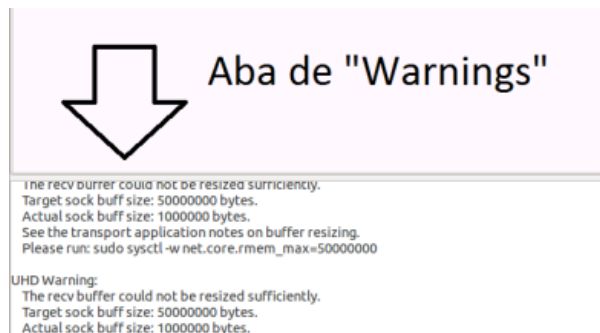
11. Agora chegou a hora de configurarmos o bloco **Rational Resampler**. Como já dito em hands-on anteriores é bem simples o cálculo. Na verdade, é uma pequena divisão entre a taxa de amostragem que queremos (2.4 GHz) e a que temos (192 kHz). Senão quiser calcular pode inserir os valores já calculados abaixo. Todo o projeto foi baseado em um arquivo .wav com taxa de amostragem de 48 kHz. Se o arquivo estiver com amostragem diferente, você pode usar um bloco **Rational Resampler** entre o bloco **Wav File Source** e o bloco **WBFM Transmit**, mas isso pode trazer problemas de desempenho. O bloco **Rational Resampler** deve ficar configurado como na figura a seguir.



12. Configure o bloco **QT GUI Range** para controlar o valor do ganho de RF no bloco **UHD: USRP Sink** (já configurado). Altere o **ID** do bloco **QT GUI Range** para **rf\_gain**. Altere o campo **Default Value** para 5, mude o valor dos campos **Start**, **Stop** e **step** para 0, 10 e 1, respectivamente. O bloco deve ficar configurado como na figura a seguir.



13. Quando a execução do projeto for feita, você pode verificar alguns problemas devido a parâmetros que o GNU Radio não tem permissão para mudar sozinho. Para isso iremos mudar os valores manualmente. Quando você executar o projeto aparecerá na aba de “*warnings*” uma mensagem que diz que o computador não conseguiu mudar os valores de alguns buffers. Mas felizmente, o computador já fornece o comando pronto para ser executado. A figura a seguir mostra um exemplo desse tipo de warning.



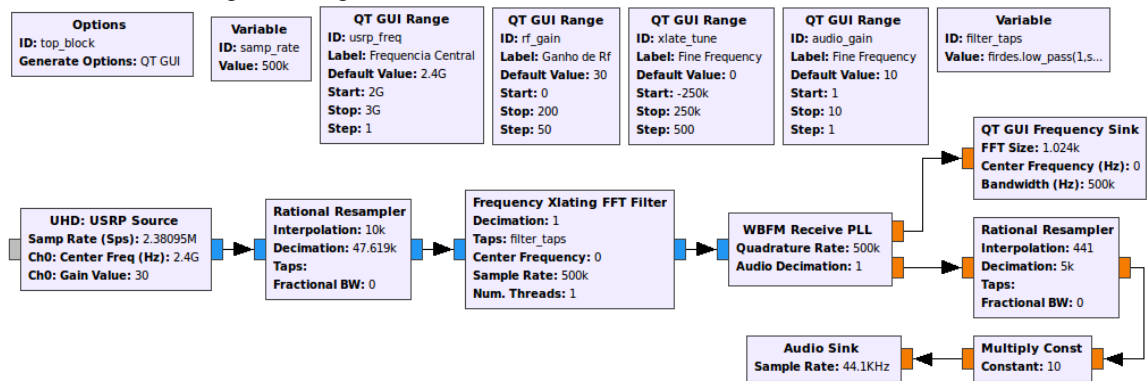
A mensagem é repetida abaixo caso a figura não seja legível.

UHD Warning:

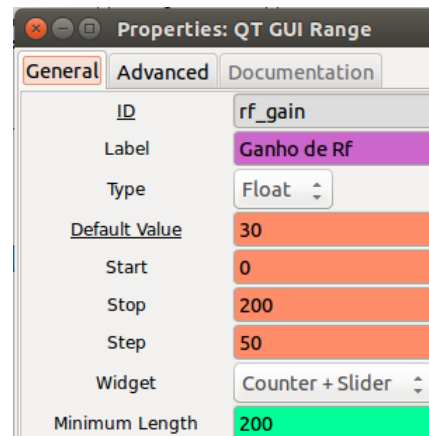
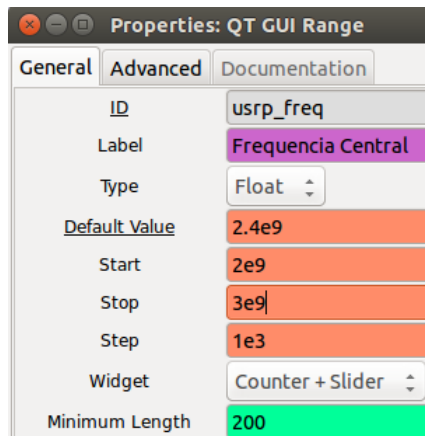
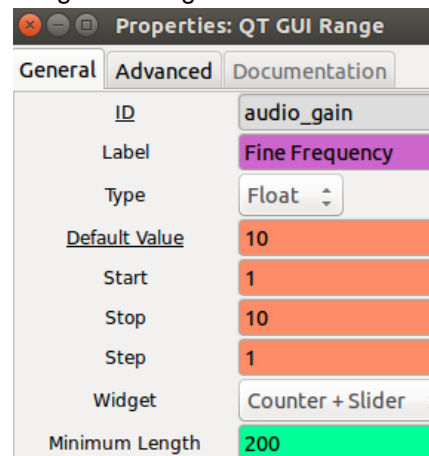
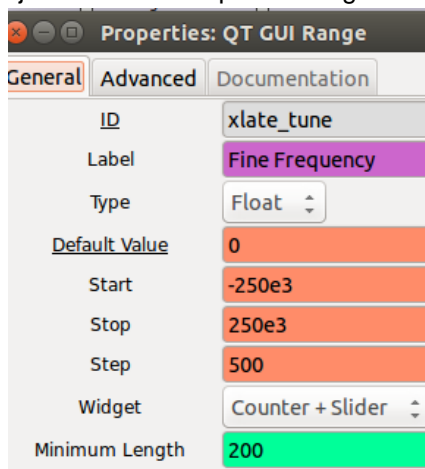
The recv buffer could not be resized sufficiently.  
 Target sock buff size: 50000000 bytes.  
 Actual sock buff size: 10000000 bytes.  
 See the transport application notes on buffer resizing.  
**Please run: `sudo sysctl -w net.core.rmem_max=50000000`**

14. Agora abra um Terminal, copie e cole exatamente o comando que foi indicado no warning. Ele pedirá a senha do PC. Execute todos os comandos que foram indicados na aba warning. E ao termino o projeto estará pronto para ser executado sem nenhum problema.
15. Agora podemos executar o projeto, e o mesmo deverá funcionar perfeitamente. Uma rádio FM está transmitindo na frequência de 2,4 GHz. Deixe esse projeto executando em outro computador e só execute no momento de usar para não interferir em comunicações acontecendo em 2,4 GHz.
16. Para testar e ouvir o que o transmissor está irradiando, iniciaremos agora o projeto do receptor. Configure um novo *flowgraph* com os seguintes blocos: 3 blocos **QT GUI Range**, um **UHD USRP Source**, dois **Rational Resampler**, um **Frequency Xlating FIR Filter**, um **WBFM Receiver**, um

**Variable**, um **QT GUI Frequency Sink**, um **Multiply Const**, um **Audio Sink**. Disponha os blocos de forma similar a figura a seguir.

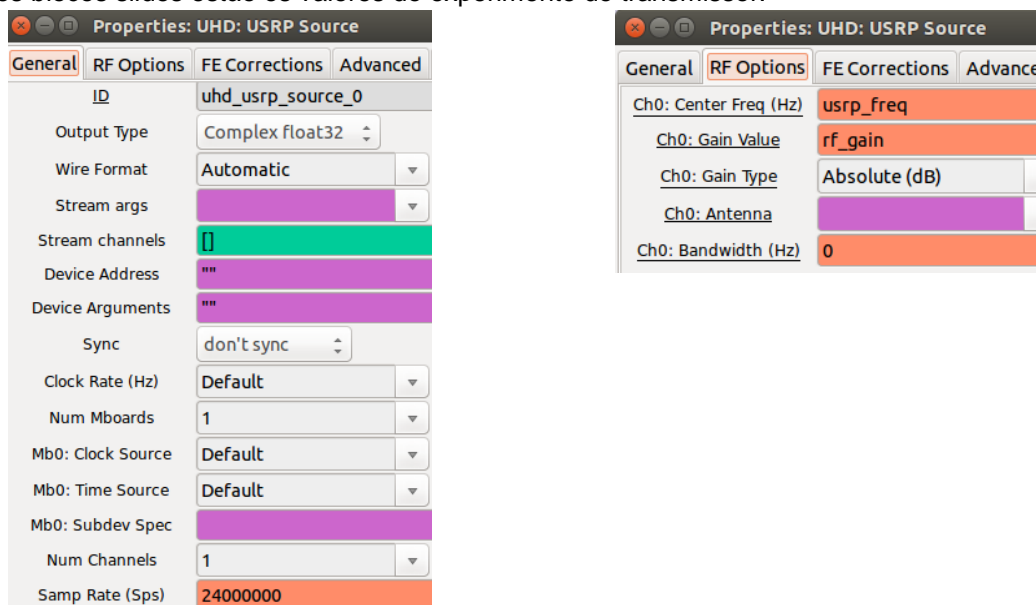


17. Em ordem vamos configurar os blocos slides do projeto. São 3 blocos responsáveis por parâmetros ajustáveis do receptor. Configure os blocos como nas figuras a seguir.

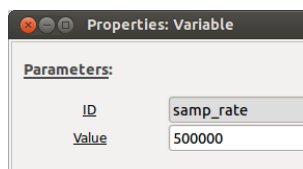


18. Configurados, agora eles podem substituir valores em outros blocos. Configuraremos agora o bloco **UHD USRP Source**, o qual é responsável pela entrada de sinal no receptor. Ele deverá ter a mesma taxa de amostragem (*Samp Rate*) que a do transmissor. Logo sua configuração é

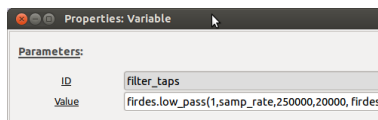
semelhante a do transmissor. Mas agora em vez de usar valores exatos, usaremos os blocos slides para podermos variar esses valores. Configure o bloco como na figura a seguir. Pode-se perceber que nos blocos slides estão os valores do experimento do transmissor.



19. Agora iremos configurar o bloco **Variable** que contém a variável *samp\_rate*. Vamos usar um valor de 500000 amostras por segundo. Valor escolhido com base nos filtros que serão configurados mais a frente. Um grande exemplo disso é o bloco **Frequency Xlating FIR Filter** que necessita de filtros para que possa transladar o sinal de banda-passante para banda-base. Configure o bloco **Variable** como na figura a seguir.

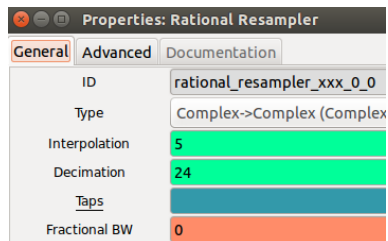


20. Iremos agora configurar o outro bloco **Variable** que adicionamos ao projeto. Esse bloco guardará o valor da variável *taps* que iremos usar no bloco **Frequency Xlating FIR Filter**. Essa variável é responsável por todos os parâmetros importantes do bloco, tais como: largura de banda, frequência de corte, numero de "taps" e algumas outras variáveis. Configure o campo *value* do bloco com `firdes.low_pass(1,samp_rate,250000,20000, firdes.WIN_HAMMING, 6.76)`. O bloco ficará como na figura a seguir.

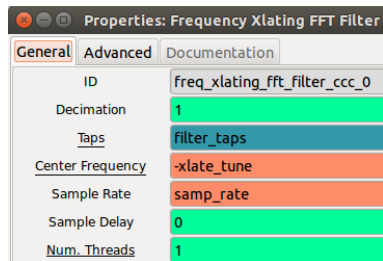


21. Agora vamos configurar o bloco **Rational Resampler** que está ligado entre os blocos **UHD USRP Source** e o bloco **Frequency Xlating FIR Filter**. Como explicado anteriormente, é muito simples usar este bloco. É apenas uma divisão entre a taxa de amostragem de entrada e a taxa desejada na saída. No nosso caso, estamos em 24 MHz e queremos 500 kHz. O bloco **Rational Resampler** não aceita valores decimais. Logo vemos que a melhor razão para estes valores é de 5/24. Como

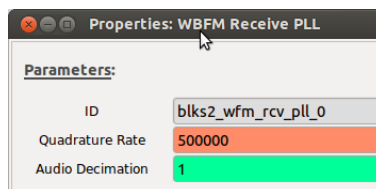
mostra o bloco a seguir.



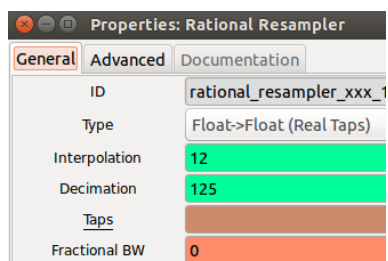
22. Agora podemos configurar o bloco **Frequency Xlating FFT Filter**. Configure o bloco como na figura a seguir. Configurar o campo *Taps* com *filter\_taps*, o campo *Center Frequency* para *-xlate\_tune* e o campo *Sample Rate* para *samp\_rate*.



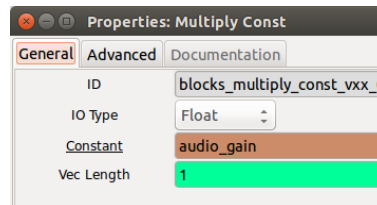
23. Agora vamos configurar o bloco **WBFM Receiver**. A variável *Quadrature rate* diz respeito a taxa de amostragem do sinal de entrada. *Audio Decimation* diz respeito a decimação que o sinal de saída do bloco sofrerá, podendo ser 1 quando não se deseja decimação alguma. No nosso caso, deixaremos a decimação em 1, pois usaremos um bloco **Rational Resampler** para mudar a taxa de amostragem de 500 kHz para 48 kHz. O bloco deve ficar como na figura a seguir.



24. Agora vamos configurar o bloco **Rational Resampler** que está ligado entre os blocos **WBFM Receiver** e o bloco **Audio Sink**. Como explicado anteriormente, é muito simples usar este bloco. É apenas uma divisão entre a taxa de amostragem de entrada e a taxa desejada na saída. No nosso caso, estamos em 500 kHz e queremos 48 kHz. O bloco **Rational Resampler** não aceita valores decimais. Logo vemos que a melhor razão para estes valores é de 12/125. Como mostra o bloco a seguir.



25. Configure o bloco **Multiply Const** como a seguir.



26. Finalmente, o bloco **Audio Sink** ligado ao bloco **WBFM Receiver** não precisa de configuração. Somente cheque se ele está configurado com 44,1 kHz de *Sample Rate*. Ele deve ficar como na figura a seguir.



27. Como o transmissor ligado, execute seu projeto!!!