

# Protótipo para Sensoriamento Espectral Cooperativo Centralizado com Transceptor WaveRunner

Dayan Adionel Guimarães, Danielle de Carvalho Marchetti e Rausley Adriano Amaral de Souza

**Resumo**—Este artigo descreve um protótipo de testes para sensoriamento espectral implementado com o transceptor WaveRunner e o aplicativo VisSim/Comm, como alternativa às soluções comumente baseadas na plataforma USRP & GNU Radio. O protótipo adota a detecção de energia em um esquema de sensoriamento cooperativo centralizado com fusão de dados e até oito rádios cognitivos. Demonstra-se com esse protótipo a factibilidade da implementação prática do sensoriamento cooperativo em canal com desvanecimento Rayleigh para aplicações de rádio cognitivo com o transceptor WaveRunner, podendo ser ele modificado para operar com outras técnicas diferentes da detecção de energia.

**Palavras-Chave**—*Deteção de energia, rádio cognitivo, sensoriamento espectral, VisSim/Comm, WaveRunner.*

**Abstract**—This paper describes a testbed prototype implemented with the WaveRunner transceiver card and the VisSim/Comm software for the purpose of spectrum sensing, as an alternative to the commonly-adopted solutions based on the USRP & GNU Radio. The testbed applies the energy detection in a data fusion, centralized cooperative spectrum sensing with up to eight cognitive radios. The prototype demonstrates the feasibility of the cooperative spectrum sensing for cognitive radio applications in a Rayleigh fading channel with the WaveRunner card. It is also demonstrated that the prototype can be modified to consider other techniques besides the energy detection.

**Keywords**—*Cognitive radio, energy detection, spectrum sensing, VisSim/Comm, WaveRunner transceiver.*

## I. INTRODUÇÃO

Na atual política de alocação fixa do espectro de radiofrequências, este recurso tem seu uso licenciado por órgãos reguladores do Governo, sendo destinada uma banda de frequências para cada serviço. No Brasil, a tarefa de alocação e administração do uso do espectro é realizada pela Anatel (Agência Nacional de Telecomunicações). No entanto, com a crescente necessidade de alocar novos serviços de comunicações sem fio e também de aumentar a banda destinada a serviços já existentes, a demanda pelo espectro de radiofrequência tem aumentado significativamente, tornando esse recurso cada vez mais escasso. Entretanto, pesquisas foram realizadas e notou-se que grande parte do espectro licenciado é subutilizado em determinados períodos de tempo, espaço ou ambos [1]. Isto implica a existência de oportunidades de uso desse espectro, oportunidades estas que podem ser exploradas por dispositivos que sejam capazes de acessar as bandas ociosas de forma adaptativa e dinâmica. Essa capacidade é em grande parte baseada no conceito de rádio definido por *software* (SDR, *software-defined radio*), dispositivo de comunicação sem fio que possui parte de suas

funções implementadas por *software*. Como evolução do conceito de SDR surge o conceito de rádio cognitivo (RC) [2], uma tecnologia que, dentre outras funcionalidades, permite o compartilhamento do espectro entre usuários primários (usuários que possuem licença de operação) e usuários secundários (aqueles que não possuem licença de operação). Dentro do chamado Ciclo Cognitivo, uma das principais tarefas de um RC é a capacidade de sensoriar o espectro de forma a detectar as oportunidades de utilização, as quais podem ser definidas como as faixas de frequência que não estão sendo utilizadas pelo usuário primário em um dado momento e em uma dada região observada. Quando é detectada uma oportunidade, o RC passa a realizar a transmissão dentro da faixa de frequências livre. Caso o usuário primário volte a utilizar aquela faixa, o usuário secundário interrompe sua transmissão e passa a operar em outra lacuna disponível, a fim de não causar interferências na rede primária.

O sensoriamento espectral pode ser realizado por meio de várias técnicas, dentre elas a detecção de energia, a detecção por filtro casado, a detecção por propriedades ciclo-estacionárias do sinal e a detecção pelos autovalores da matriz de covariância do sinal recebido [3]. Independente da técnica adotada, o sensoriamento espectral pode ser classificado como não cooperativo ou cooperativo [4]. No primeiro caso o sensoriamento é realizado de forma independente por cada RC. No segundo caso, objetivando melhorar o desempenho do sensoriamento, os RCs colaboram entre si no processo de decisão sobre o estado de ocupação da banda sensorizada. O sensoriamento cooperativo pode ser centralizado ou distribuído. No sensoriamento centralizado as informações necessárias para a decisão sobre o estado de ocupação do canal obtidas por cada RC são enviadas a um centro de fusão (CF), onde a decisão final é tomada. Tais informações podem ser os valores de amostras de sinal colhidas por cada RC (processo denominado fusão de dados) ou decisões individuais de cada RC (processo chamado de fusão de decisões), as quais são combinadas no CF. No sensoriamento distribuído as informações sobre o canal sensorizado são compartilhadas entre os RCs sob cooperação que, de forma iterativa, decidem em conjunto sobre o estado de ocupação do canal.

Vários protótipos ou plataformas de testes (*testbeds*) para sensoriamento espectral já foram implementadas e descritas na literatura, a maioria delas utilizando a USRP (*Universal Software Radio Peripheral*) e o repositório de software aberto *GNU Radio*, os quais formam uma plataforma de SDR desenvolvida pela *Ettus Research* (<http://www.ettus.com/>) [5]-[8]. Neste artigo propõe-se um protótipo alternativo de plataforma de testes de sensoriamento espectral cooperativo centralizado com fusão de dados por detecção de energia,

Dayan A. Guimarães, Danielle C. Marchetti e Rausley A. A. de Souza: Instituto Nacional de Telecomunicações – Inatel, Santa Rita do Sapucaí, MG, Brasil. E-mails: [dayan@inatel.br](mailto:dayan@inatel.br), [danic.marchetti@gmail.com](mailto:danic.marchetti@gmail.com), [rausley@inatel.br](mailto:rausley@inatel.br). Este trabalho foi parcialmente financiado pelo CNPq por meio de bolsa de pesquisa científica.

utilizando a placa *WaveRunner Plus*, de fabricação da *Red Rapids, Inc.* (<http://www.redrapids.com/>, antiga *Red River, Inc.*). Esta placa consiste de um transceptor de até oito canais independentes, permitindo que o sensoriamento cooperativo seja implementado com até oito RCs. A placa é controlada e configurada por computador, onde é conectada por meio de uma interface PCI. As funcionalidades de sensoriamento são todas implementadas no ambiente do *software* de simulação de sistemas de comunicação *VisSim/Comm* (<http://www.vissim.com/products/vissim/comm.html>), desenvolvido pela *Eriteck, Inc.* em parceria com a *Visual Solutions, Inc.*

O restante do artigo está organizado da seguinte maneira: na Seção II descreve-se a placa transceptora *WaveRunner Plus*, assim como suas principais funcionalidades e formas de configuração. Na Seção III descreve-se como a placa é aplicada ao cenário de sensoriamento espectral. A Seção IV apresenta alguns resultados de desempenho do protótipo implementado. A Seção V conclui o trabalho e registra algumas oportunidades para continuidade das pesquisas.

## II. TRANSECTOR WAVE RUNNER PLUS

Nesta seção descreve-se a placa *WaveRunner Plus* [9] e seu aplicativo de configuração, o *WaveFormer II*. Na seção seguinte é explicado como esta placa pode ser utilizada para construção de uma plataforma de testes de um sistema de sensoriamento espectral cooperativo.

A placa *WaveRunner Plus* é um transceptor capaz de ser configurado para operar com até oito canais, sendo controlado através de uma interface PCI com o computador. Além de um aplicativo de configuração específico (*WaveFormer*), possui interface com o *software* de simulação de sistemas de comunicação *VisSim/Comm*, de forma que os sinais de entrada e saída da placa possam ser gerados e processados por meio deste *software*.

### A. Diagrama de blocos do transceptor *WaveRunner Plus*

A Figura 1 mostra o diagrama de blocos [9] do transceptor *WaveRunner Plus*. Na entrada de recepção (RX IN) o sinal analógico é encaminhado através de um atenuador variável que controla digitalmente o nível do sinal a ser processado posteriormente. Em seguida tem-se um amplificador de baixo ruído (LNA, *low noise amplifier*) que promove uma amplificação eficiente em termos da geração de baixo nível de ruído interno, ou seja, opera com baixa figura de ruído. Juntos, o atenuador variável e o LNA podem fazer parte de um controle automático de ganho (AGC, *automatic gain control*), o qual pode ser habilitado ou desabilitado e tem suas características configuráveis. Uma vez amplificado, o sinal passa por um processo de filtragem para rejeitar interferências e evitar *aliasing* antes do processo de conversão analógico-digital (ADC, *analog-to-digital conversion*). O filtro escolhido depende da configuração de fábrica do *hardware*, que pode ser em banda base ou banda passante. A plataforma de teste desenvolvida utiliza a placa configurada para operação em banda base, a qual utiliza um filtro *Chebyshev* (passa baixa) com banda de passagem de aproximadamente 40 MHz. Posteriormente ao processo de filtragem tem-se um ADC e dois QPDC (*quad programmable digital downconverter*). Juntos, o ADC e os QPDCs são responsáveis pela digitalização do sinal, pela conversão digital para banda base (DDC, *digital down-conversion*) e pela divisão da banda total em sub-bandas de um a oito canais configuráveis por *software*. O bloco controlador (*Controller*) executa todas as funções de comando

e controle locais, ao mesmo tempo atuando como uma interface para o computador.

Já na etapa de transmissão, as amostras providas da interface PCI são armazenadas em um *buffer* e transferidas para os oito canais disponíveis nos QPDCs (*quad programmable digital upconverter*). As saídas dos oito canais são somadas para formar um único fluxo de amostras e, após este processo, essas amostras alimentam um conversor digital-analógico (D/A ou DAC, *digital-to-analog converter*) a fim de gerar um sinal de saída analógico. Em seguida o sinal passa por um processo de filtragem passa baixas (operando em banda base), é amplificado e dirigido à saída da placa via conector TX OUT.

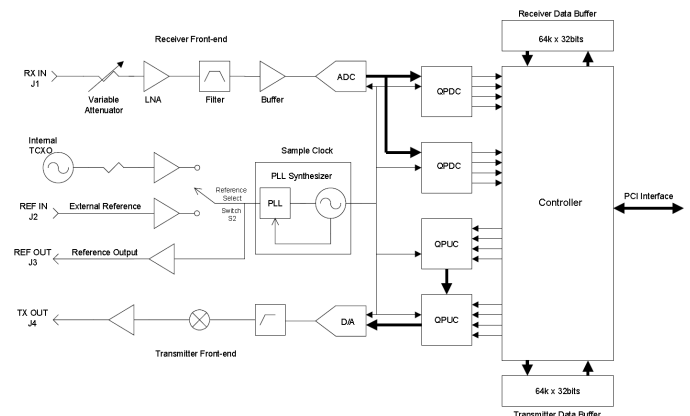


Fig. 1. Diagrama de blocos do transceptor *WaveRunner Plus* [9].

### B. Aplicativo de configuração *WaveFormer II*

O *WaveFormer II* é um aplicativo proprietário da *Red Rapids, Inc.* que é executado na plataforma *Microsoft Excel* e é capaz de gerar arquivos de configuração da placa *WaveRunner*. A ferramenta de configuração gera um conjunto de arquivos contendo configurações e um mapa de alocação de memória completo que é transferido à placa *WaveRunner*. Os arquivos de configuração são gerados sob solicitação pelo setor de Suporte da *Red Rapids, Inc.* Em raras exceções, como no caso do Intel, em que a placa foi adquirida no contexto do Projeto Lambda (<http://www3.intel.br/lambda/>), tal aplicativo é disponibilizado ao usuário para que ele próprio possa efetuar a configuração da placa. Ressalta-se, contudo, que a operação desse aplicativo é bastante complexa e demanda grande preparação. A Figura 2 mostra a imagem da tela principal do *WaveFormer II*, onde cada bloco corresponde a uma parte do *hardware* da placa *WaveRunner*. Vários desses blocos podem ser expandidos em um ou mais sub-blocos que, por sua vez, têm parâmetros específicos de configuração. No total, as possibilidades de configuração são muito grandes.

## III. ADAPTAÇÃO DO TRANSECTOR WAVE RUNNER PLUS AO CENÁRIO DE SENSORIAMENTO ESPECTRAL COOPERATIVO

Em um cenário real de sensoriamento cooperativo centralizado com fusão de dados têm-se como principais elementos os transmissores primários, os rádios cognitivos, o centro de fusão e os correspondentes canais de comunicação. Como não se dispõe do *hardware* capaz de compor todos os elementos necessários a um cenário de sensoriamento real, o protótipo descrito neste artigo utiliza a placa *WaveRunner* e o aplicativo *VisSim/Comm* em duas opções de configuração: na primeira utiliza-se uma configuração *loopback* em um único transceptor conectado em um único computador, não sendo de

fato transmitido nenhum sinal de radiofrequência: o sinal de saída da etapa de transmissão da placa retorna à entrada da etapa de recepção. Na segunda opção admite-se a existência de um amplificador, um conversor para cima (*up-converter*) e uma antena de transmissão acoplados à etapa de transmissão de um transceptor conectado em um computador, mais um *front-end* acoplado à etapa de recepção de outro transceptor disposto remotamente em outro computador. Nesta última opção é possível realizar o sensoriamento em um ambiente de propagação real, enquanto na primeira o ambiente de propagação é simulado. Ambas as opções são mais bem descritas nas subseções seguintes.

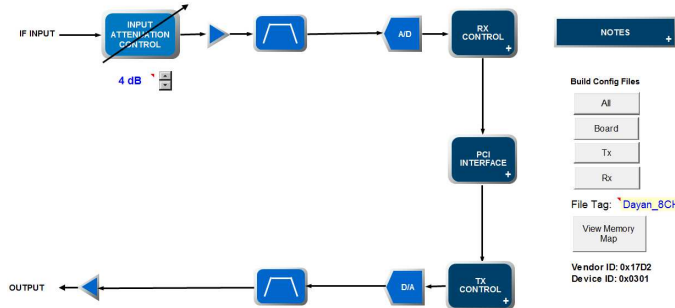


Fig. 2. Imagem da tela principal do aplicativo *WaveFormer II*.

A. *Configuração com um único transceptor em loopback*

Esta opção de configuração é ilustrada na Figura 3, onde está implementado, no ambiente do *VisSim/Comm*, o sensoriamento com quatro RCs sob cooperação e um transmissor primário. Como o transceptor *WaveRunner* possui até oito canais, pode-se facilmente modificar o diagrama da Figura 3 de forma a se implementar o sensoriamento com até oito RCs sob cooperação.

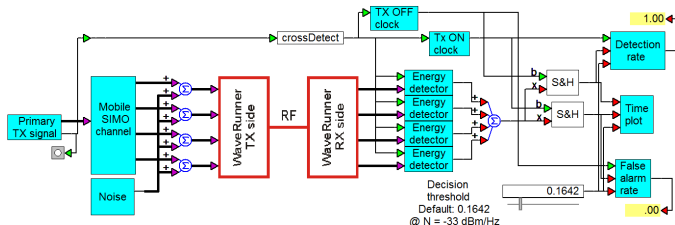


Fig. 3. Sensoriamento espectral cooperativo por detecção de energia no aplicativo *VisSim/Comm*, utilizando o transceptor *WaveRunner Plus*.

A placa *WaveRunner* está destacada ao centro do diagrama da Figura 3, onde se pode notar a presença de quatro entradas e quatro saídas, as quais representam a interface que o computador (*software VisSim/Comm*) faz com a placa. A conexão entre a etapa de transmissão (*TX side*) e a etapa de recepção (*RX side*) da placa representa uma ligação do tipo *loopback* entre os conectores de saída e de entrada de sinal (faixa de 0,1 a 40 MHz) da placa.

Inicialmente um sinal primário aleatório é gerado pelo *VisSim/Comm*, assim como o efeito do canal entre o transmissor primário e os quatro RCs. O ruído térmico de entrada dos RCs é simulado por meio da geração, também no *VisSim/Comm*, de um ruído Gaussiano branco de média nula e variância (potência) ajustável. Então, o que se aplica como entrada da placa são os sinais sob desvanecimento, como se fossem aqueles presentes nas antenas de recepção dos quatro RCs, sinais estes posteriormente contaminados com o ruído térmico gerado em cada RC. Em seguida a placa *WaveRunner*

realiza o processamento do sinal a fim de emular os processamentos realizados nos vários RCs. Após percorrer todo o caminho de TX/RX, o sinal na saída da placa é convertido para banda base e retorna para o *VisSim/Comm*. No *VisSim/Comm* os sinais passam pelo cálculo de energia, a qual é comparada com um limiar e então é tomada a decisão quanto à ocupação do canal.

O sinal gerado pelo bloco *Primary TX signal* corresponde a um ruído Gaussiano branco com banda de 25 kHz (metade da frequência de simulação de 50.000 Hz), chaveado por uma onda quadrada com 50% de *duty-cycle*, simulando assim a presença (estado *on*) e a ausência (estado *off*) do sinal primário na banda sensorizada. Nesse bloco é possível configurar a frequência de chaveamento, o ganho aplicado ao sinal gerado e também é possível manter o sinal permanentemente no estado ligado (*on*). Na configuração *default* a simulação é executada por 20 segundos, o que significa que o número de vezes que o transmissor primário alterna seu estado será função da frequência de chaveamento configurada.

O bloco *Mobile SIMO channel* é formado por quatro simuladores de canal com desvanecimento Rayleigh, os quais atuam sobre o sinal Gaussiano primário gerando sinais Gaussianos com banda de 25 kHz em suas saídas, mas afetados independentemente pelos correspondentes ganhos de canal. Nesse bloco pode-se configurar a frequência Doppler associada aos simuladores de canal, configurando-se, portanto, a taxa de variação dos desvanecimentos. Pode-se também desconsiderar os efeitos do canal com desvanecimento através de uma opção de *bypass*.

O sinal de saída de cada simulador de canal é somado com um ruído branco, indicado na figura como *Noise*, que pode ser configurado com o nível desejado. Pode-se também desativar a presença de ruído escolhendo a opção *Always OFF*. A inserção de ruído além daquele gerado internamente na placa (ruído térmico) foi realizada para que não fosse necessário operar com níveis de sinal muito pequenos para controlar a relação sinal-ruído (SNR, *signal-to-noise ratio*).

Os sinais sob desvanecimento e contaminados com ruído ocupam a mesma banda de 25 kHz (metade da frequência de simulação). De forma a simular os múltiplos canais entre o transmissor primário e cada RC, tais sinais são filtrados internamente na placa *WaveRunner* com filtros passa-baixas de cerca de 10 kHz de largura de banda. Em seguida, depois de passar pela cadeia de processamento mostrada na Figura 1, os sinais são transladados para as frequências de 10, 12, 14 e 16 MHz e direcionados à saída da placa. Tal translação é realizada para que se simulem os quatro caminhos ortogonais (não interferentes) e independentes entre o transmissor primário e os RCs. O sinal de saída então é redirecionado à etapa de entrada da placa (ver Figura 1) em *loopback*. Percorrendo o caminho de recepção, os quatro sinais são reenviados ao *software VisSim/Comm*, onde o restante do processamento é realizado, conforme descrito a seguir.

Os blocos *Energy detector* calculam as energias (médias das somas dos quadrados) dos valores das amostras com retenção (S&H, *sample and hold*) obtidas nas quatro saídas indicadas na Figura 3, os quais são somados para que o valor de energia resultante seja comparado com um limiar de decisão (*decision threshold*). Tal limiar é ajustado de modo a se obter o desempenho necessário do processo de sensoriamento. Para

que seja utilizada outra técnica de detecção, basta que os blocos de detecção de energia sejam substituídos por blocos que computem a variável de decisão por outro método. Por exemplo, os sinais de saída da placa poderiam ser amostrados para que fosse estimada a matriz de covariância do sinal recebido, a partir da qual seriam estimados os autovalores. Estes, por sua vez, seriam utilizados no cômputo da variável de decisão para o sensoriamento baseado em autovalores. Como mencionado mais adiante, esta é uma oportunidade de continuidade das pesquisas usando o protótipo ora descrito.

Note que o cômputo da energia do sinal recebido pelos RCs sob cooperação está sendo realizado diretamente a partir das saídas do transceptor *WaveRunner*. Como na prática tal energia seria computada no CF a partir das amostras encaminhadas pelos CRs via canal de controle, aqui se está simulando uma situação em que não há erros no canal de controle e a quantização das amostras é praticamente infinita (operação em ponto flutuante no ambiente *VisSim/Comm*).

O desempenho do sensoriamento é tipicamente avaliado por meio de dois parâmetros: a probabilidade de falso alarme,  $P_{fa}$ , e a probabilidade de detecção,  $P_d$ . A primeira correspondente à probabilidade de se tomar a decisão pelo estado ocupado do canal sensoriado, sendo que o sinal de um usuário primário não está de fato sendo transmitido. A  $P_d$  que corresponde à probabilidade de se decidir por um canal ocupado quando se tem de fato um canal ocupado, ou seja, um canal com o sinal primário presente. Os blocos *Detection rate* e *False alarm rate* são responsáveis por computar e indicar as taxas (estimativas de probabilidade) de detecção e de falso alarme. Tais probabilidades,  $P_d$  e  $P_{fa}$ , são estimadas dividindo-se o número de detecções de sinal primário presente pelo número de vezes que o transmissor primário esteve no estado *on* e *off*, respectivamente.

Os blocos *CrossDetect*, *Tx ON Clock* e *Tx OFF clock* são utilizados para gerar a temporização que indica os instantes em que o transmissor primário está nos respectivos estados. Essa temporização auxilia o processo de amostragem e cálculo da energia nos quatro canais de saída da placa *WaveRunner*.

O bloco *Time Plot* mostra os níveis de energia do sinal recebido na presença e na ausência de sinal primário, bem como o limiar de decisão. A Figura 4 ilustra um resultado para uma taxa de chaveamento de 5 Hz do sinal primário. Nesse caso o transmissor primário alterna cem vezes entre os estados *on* e *off* dentro do período de observação *default* de 20 segundos. Quanto maior for a diferença (positiva) entre o limiar de decisão e o nível de energia computado quando o sinal primário está ausente (*off*), menor a  $P_{fa}$ . Quanto maior for a diferença (positiva) entre o nível de energia computado quando o sinal primário está presente (*on*) e o limiar de decisão, maior a  $P_d$ . Na Figura 4 ilustra-se uma situação de baixa  $P_{fa}$  e alta  $P_d$ , pois o limiar é ultrapassado apenas duas vezes pelo nível de energia do sinal recebido no estado *off*, enquanto o nível de energia no estado *on* só está abaixo do limiar uma única vez.

Note que, por meio da variação da taxa de chaveamento do transmissor primário, é possível simular a variação do tempo de sensoriamento: quanto maior essa taxa, menor o tempo de sensoriamento. Entretanto, cuidado especial deve ser tomado no que diz respeito aos pulsos de temporização para cálculo da energia do sinal recebido: quando se altera a taxa de chaveamento do transmissor primário, há que se reajustar tal

temporização, uma vez que deve ser levado em conta o atraso entre a aplicação da primeira amostra à entrada da placa e a aparição do primeiro valor válido de sinal em sua saída.

A configuração em *loopback* mostrada na Figura 3 tem também um apelo didático, ou seja, o processo de sensoriamento cooperativo centralizado com fusão de dados pode ser mais bem entendido a partir da interação com o protótipo aqui descrito.

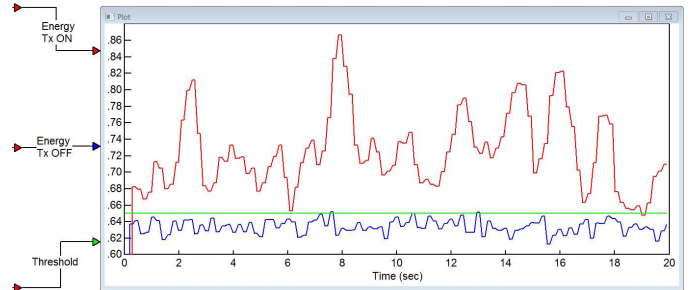


Fig. 4. Limiar de decisão (verde) e níveis de energia do sinal recebido no estado *on* (vermelho) e *off* (azul) do transmissor primário.

### B. Configuração com dois transceptores distantes

É importante mencionar que no diagrama da Figura 3 implicitamente considera-se que não há nenhum tipo de transmissão sem fio do sinal primário. Simula-se o efeito do canal por meio da geração do sinal primário na entrada do transceptor *WaveRunner* como se já estivesse sido afetado pelo desvanecimento do canal. No entanto, o protótipo ora apresentado pode ser modificado para operar com um sinal transmitido em um canal de comunicação sem fio real. Para isto pode-se fazer uso de dois transceptores dispostos distantes um do outro, um deles sendo utilizado para gerar o sinal primário (utilizando apenas a etapa de transmissão) e outro para emular o sensoriamento por um RC com múltiplas antenas (utilizando apenas a etapa de recepção). Neste caso o bloco *Primary TX Signal* é conectado diretamente às quatro entradas de uma das placas, não passando, portanto, pelo simulador de efeitos do canal e (se desejado) pela adição de ruído. O conector de saída da placa será ligado a um amplificador de potência com conversão para a faixa da radiofrequência (*up-conversion*), este por sua vez conectado a uma antena. Um *front-end* de recepção também equipado com uma antena será ligado ao conector de entrada da outra placa, podendo esta estar disposta remotamente para que se faça a análise do sensoriamento em um ambiente real de propagação, até mesmo sensoriando sinais que não tenham sido gerados pela parte de transmissão da placa remota. Os demais blocos na Figura 3 permanecem inalterados.

## IV. ALGUNS RESULTADOS E INTERPRETAÇÕES

Notadamente o principal objetivo deste artigo é apresentar o protótipo para sensoriamento espectral com o transceptor *WaveRunner Plus*. Resultados de análises utilizando o protótipo consistem no alvo natural da continuidade das pesquisas. No entanto, antecipam-se aqui alguns resultados de significativa importância prática. Em [10] sugeriu-se um modelo de RC no contexto de sensoriamento espectral cooperativo, no qual, diferentemente do que se costuma considerar na literatura, admite-se que há influência do processamento dos sinais recebidos pelos RCs no desempenho do sensoriamento. Tal modelo se assemelha em muito à etapa de recepção da placa *WaveRunner* (veja Figura 1). Em [10] constatou-se que o sistema de AGC é o principal elemento de

degradação do desempenho em relação àquele proporcionado pelo modelo convencional comumente adotado na literatura (o qual não considera nenhum tipo de processamento do sinal recebido pelos RCs). Como a placa *WaveRunner* possui um sistema de AGC, decidiu-se por verificar o desempenho do sensoriamento com ele habilitado e desabilitado. Esta iniciativa é o marco inicial de um estudo futuro mais aprofundado sobre a questão, buscando utilizar o protótipo aqui descrito como forma de validação (ou não) do modelo sugerido em [10].

Para obter os resultados supramencionados, o diagrama da Figura 3 foi modificado, passando a incorporar uma curva ROC (*receiver operating characteristic*), a qual mostra a variação nos valores de  $P_{fa}$  e  $P_d$  com a variação do limiar de decisão. Tal modificação é ilustrada na Figura 5, onde se pode notar que apenas os valores de limiar mínimo (associado ao ponto mais à direita e acima na ROC) e máximo (associado ao ponto mais à esquerda e abaixo na ROC) devem ser inseridos. A partir daí, quando se executa a simulação os valores de limiar (cinco para o caso) se alteram automaticamente de forma que a curva ROC completa seja obtida.

Na Figura 5 nota-se que há duas curvas ROC: a curva mais acima foi obtida com o sistema de AGC da placa *WaveRunner* desabilitado (AGC-off) e a mais abaixo foi obtida com o AGC habilitado (AGC-on). As ROCs em questão foram obtidas com uma SNR fixa (potência de ruído fixa), mas os valores dos limiares de decisão tiveram que ser reajustados da condição de AGC-on para AGC-off, pois os valores médios de sinal de saída da placa foram alterados de uma condição para a outra. Observa-se de fato a piora no desempenho do sensoriamento pela influência do AGC, assim como constatado em [10]. Tal piora, no entanto, não se mostrou tão acentuada quando aquela reportada em [10]. Conjectura-se que isto tenha sido causado por uma das seguintes razões, ou uma combinação delas: i) níveis de sinal não adequados à atuação do sistema de AGC da placa *WaveRunner* em toda sua faixa dinâmica, ii) modelagem do processo de AGC em [10] muito diferente daquela que melhor representaria a atuação do sistema de AGC da placa *WaveRunner*, iii) a ausência, no protótipo aqui considerado, do processo de branqueamento presente no modelo de [10] (pelo efeito de filtragem realizado pela placa, tanto sinal quanto ruído passam a ter amostras temporalmente correlacionadas, degradando como um todo o desempenho do sensoriamento e reduzindo a diferença de desempenho entre as situações de AGC-on para AGC-off). Todas essas possíveis razões representam oportunidades de investigação e continuidade das pesquisas.

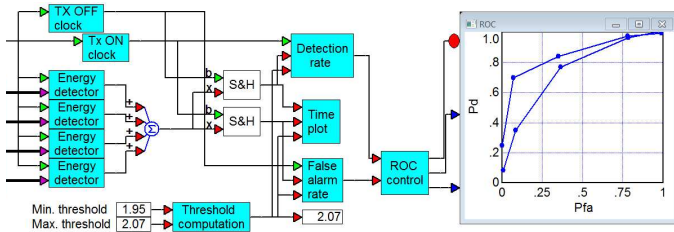


Fig. 5. Parte do diagrama da Figura 3, agora incrementado com a facilidade de apresentação da curva ROC.

## V. CONCLUSÕES

Este artigo descreveu o protótipo de uma plataforma de testes implementada com o transceptor *WaveRunner Plus* e o aplicativo *VisSim/Comm* com o propósito de sensoriamento

espectral cooperativo centralizado por detecção de energia e fusão de dados. A plataforma é uma alternativa à solução mais amplamente adotada com os recursos GNU Radio & USRP, demonstrando também a possibilidade de ser modificado para operar com outras técnicas diferentes da detecção de energia. A verificação das reais vantagens da solução aqui proposta frente àquelas que utilizam os recursos GNU Radio & USRP (e outros mais aqui não citados) está além do escopo deste artigo, mas constitui-se uma necessidade para continuidade das pesquisas. Outras oportunidades de continuidade das pesquisas são: i) a adaptação do protótipo para que seja utilizado o sensoriamento por autovalores em vez da detecção de energia, ii) a inclusão de *front-end*, amplificador de RF e antenas para a realização de sensoriamento a partir de sinais irradiados remotamente (vide Seção III-A), iii) a elaboração de prova de conceito para validação do modelo proposto em [10], partindo dos resultados preliminares apresentados na Seção IV.

Ressalta-se que ambas as configurações descritas na Seção III-A e II-B foram também implementadas no *VisSim/Comm* de forma que operem sem uso da placa *WaveRunner*, o que equivale a se ter uma ligação do tipo *bypass* entre as entradas e as saídas da placa mostradas na Figura 3. Além do apelo didático dessa configuração sem o transceptor, tem-se também a possibilidade de se realizar novas implementações ou modificações no ambiente de simulação do *VisSim/Comm* e que dependam somente deste. Naturalmente, a inclusão do transceptor alterará os resultados do conjunto devido à cadeia de processamento de transmissão e recepção. Aqueles que tiverem o *software VisSim/Comm*, mesmo na versão *Viewer*, podem solicitar diretamente aos autores os correspondentes arquivos contendo as implementações referentes às Figuras 3 e 5, com ou sem a placa *WaveRunner Plus*.

## AGRADECIMENTO

Ao CNPq pelo apoio financeiro ao projeto.

## REFERÊNCIAS

- [1] M. A. McHenry, P. A. Tenhula and D. McCloskey, "Chicago Spectrum Occupancy Measurements & Analysis and a Long-term Studies Proposal", *Shared Spectrum Co. Report*, November 2005.
- [2] J. Mitola and G. Q. Maguire, "Cognitive radio: making software radios more personal", *IEEE Personal Comm.*, vol. 6, no. 4, pp. 13-18, 1999.
- [3] E. Axell, G. Lues and E. G. Larsson, "Overview of Spectrum Sensing for Cognitive Radio". In: *Proc. of the 2nd Int. Workshop on Cognitive Information Processing*, June 2010.
- [4] I.F. Akyildiz, B.F. Lo and R. Balakrishnan, "Cooperative spectrum sensing in cognitive radio networks: a survey", *Physical Communication* 4, pp. 40-62, 2010.
- [5] Md.-A. Rahman, et al., "Development of Spectrum Sensing System with GNU Radio and USRP to Detect Emergency Radios", *IEICE Technical Report SR2009-57*, October 2010.
- [6] M. Dolter, E. Kim and S. G. Min, "Spectrum Sensing using Software Radios", *Design Document May10-06*, Iowa State University, EUA, May 2006.
- [7] M. A. Sarijari, et al., "Energy Detection Sensing Based on GNU Radio and USRP: An Analysis Study", *Proceedings of the 2009 IEEE 9th Malaysia International Conference on Communications*, Kuala Lumpur Malaysia, December 2009.
- [8] P. S. Coutinho, "Detecção de Energia para Rádios Cognitivos Usando GNU radio e USRP2", *Projeto de Graduação, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica/COPPE*. Março 2011.
- [9] Red Rapids (former Red River), Inc. Publication No. REF-303-000-R01, *WaveRunner Plus, Channel Surfer, Channel Blaster, Hardware Reference Manual*, 2003.
- [10] D. A. Guimarães and R. A. A. de Souza, "Implementation-Oriented Model for Centralized Data-Fusion Cooperative Spectrum Sensing", *IEEE Comm. Letters*. vol.16, no.11, pp.1804-1807, November 2012.