

Analisando Sinais de RADAR de Raios Cósmicos Ultra-Energéticos Usando Filtragem Ótima

L. M. de Andrade Filho, J. M. Seixas

Laboratório de Processamento de Sinais - COPPE/EP/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil

F. M. L. de Almeida Jr, Cristina S. Vianna

Instituto de Física/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil

H. Takai

Brookhaven National Laboratory, New York, USA

(Received August 10, 2006)

The MARIACHI project (Mixed Apparatus for RADAR Investigation of Cosmic ray of High Ionization), at the Brookhaven National Laboratory, intends to detect ultra-high-energy cosmic rays (UHECR) by using forward scattering of electromagnetic waves (cosmic rays can ionize the atmosphere, reflecting the VHF electromagnetic waves). The reflected signals are captured by antennas and demodulated by receivers, featuring low signal-to-noise ratio. The present work makes use of optimal filtering for detecting UHECR in the MARIACHI context.

I. INTRODUÇÃO

UHECR são partículas que atingem a Terra com energia superior a 10^{17} eV. A natureza das partículas primárias e este processo de aceleração tornou-se uma das grandes questões da física, levando-se à construção de modernos instrumentos para detecção e estudo de HEGR.

O projeto MARIACHI (*Mixed Apparatus for RADAR Investigation of Cosmic ray of High Ionization*) [1], localizado no Laboratório Nacional de Brookhaven (BNL), busca detectar raios cósmicos de altíssimas energias, utilizando a técnica de espalhamento para frente de ondas eletromagnéticas [2]. Este método, já bastante utilizado na detecção de meteoros, pode ser adaptado para raios cósmicos, pois, assim como no caso de meteoros, os UHECR são capazes de ionizar a atmosfera, refletindo ondas eletromagnéticas do tipo VHF (Very High Frequency). Os sinais refletidos são captados por antenas e demodulados por um receptor, tendo como característica uma baixa relação sinal-ruído, devido à fraca intensidade das ondas refletidas. Deste modo, faz-se necessário o uso de técnicas apuradas de detecção e classificação de sinais em ambientes ruidosos.

O presente trabalho utiliza processamento estatístico de sinais, baseado em filtragem ótima, para a detecção de UHECR no âmbito do MARIACHI. Nesta técnica, as propriedades estatísticas do ruído aditivo, que mascara o sinal a ser detectado, e do próprio sinal são utilizadas para a construção de um filtro linear que maximiza a relação sinal-ruído, conhecido como filtro-casado. A detecção de raios cósmicos foi feita de forma *off-line* a partir de dados reais digitalizados. A implementação do filtro-casado e alguns resultados são discutidos.

II. O PROJETO MARIACHI

O princípio de funcionamento do detector do MARIACHI pode ser visto na Figura 1. Partículas carregadas de um chuveiro atmosférico ionizam a atmosfera. A atmosfera ion-

izada reflete as ondas eletromagnéticas emitidas por uma antena transmissora distante. Se uma antena receptora captar estas ondas eletromagnéticas é porque houve uma reflexão, o que indiretamente leva à detecção de um chuveiro atmosférico. Não há detecção direta das ondas pois a receptora e a transmissora estão abaixo da linha do horizonte. Devido ao método utilizado, pode-se detectar, a grandes distâncias, não apenas raios cósmicos, mas qualquer fenômeno físico capaz de ionizar a atmosfera, como, por exemplo, meteoros e relâmpagos. No caso UHECR podem-se usar detectores de superfície, como cintiladores, por exemplo, para calibração do sistema de detecção usando as ondas eletromagnéticas.

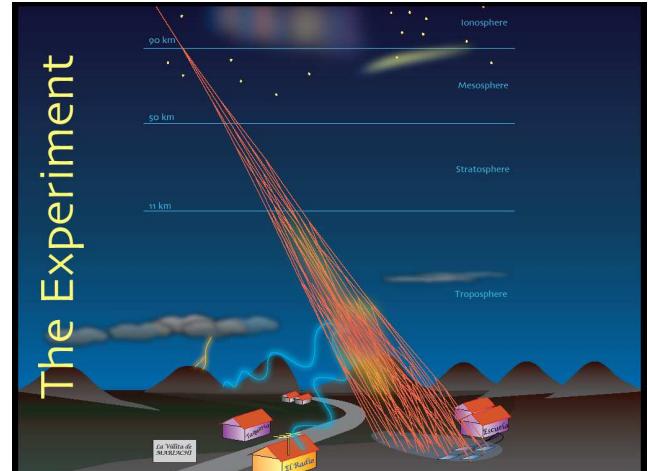


FIG. 1: Princípio de funcionamento do MARIACHI.

O espalhamento pra frente (*forward scattering*) de ondas de rádio por nuvens de gases ionizados é um fenômeno físico bem estabelecido e descrito pelas leis do eletromagnetismo clássico [2]. Devem-se utilizar estações transmissoras de ondas VHF (Very High Frequency), na faixa entre 30 e 300 MHz, situadas a uma grande distância da estação receptora. Assim, o sinal direto da transmissora não é detectado pela receptora,

pois esta encontra-se abaixo do horizonte e, também, não há reflexão pela ionosfera nesta faixa de freqüência. Para que haja reflexão de ondas VHF, é necessário que a densidade eletrônica do meio ionizado seja maior que um limiar que depende da freqüência dessas ondas.

III. O SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS

O MARIACHI é um projeto ainda em fase embrionária. Protótipos montados com equipamentos comerciais estão sendo utilizados para adquirir resultados preliminares. A Figura 2 mostra o sistema utilizado para aquisição dos primeiros dados experimentais, obtidos com a técnica do MARIACHI. Os receptores de rádio estão sintonizados em canais comerciais de televisão. Foram escolhidos os canais 2 (55,25 MHz) e 4 (67,25 MHz). Devido a fatores como distância da transmissora e freqüência da portadora, estes sinais só atingem a antena receptora, localizada no BNL, por reflexão na atmosfera. Os sinais gerados pelos cintiladores são adquiridos utilizando-se uma eletrônica padrão NIM (*Nuclear Instruments and Methods*). Um relógio GPS (*Global Positioning System*) é utilizado para que se possa determinar, com precisão, o instante no qual ocorreu um evento. Os sinais analógicos são convertidos em sinais digitais de até 24 bits a uma taxa de amostragem variando de 8 kHz a 96 kHz, por uma placa de som. Esta interface é conectada a um computador que possui o *software* de controle e de aquisição de dados. Os dados digitalizados são armazenados em mídia permanente de alta capacidade para posterior análise *offline*.

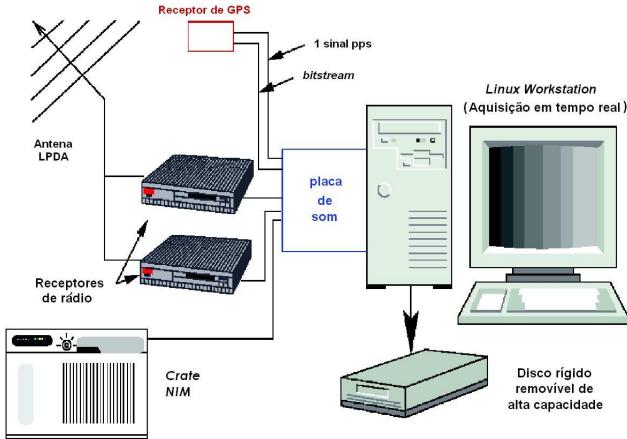


FIG. 2: Sistema de aquisição de dados do MARIACHI.

A Figura 3 apresenta a envoltória superior de um sinal que indica uma reflexão em um chuveiro atmosférico de UHECR. O sinal apresenta uma largura de aproximadamente 750 μ s. Testes com gerador de pulsos mostraram que esta é a menor largura do sinal de saída do sistema, mesmo quando a largura do sinal de entrada é da ordem de 50 μ s [3], que seria a largura da reflexão causada por um chuveiro atmosférico produzido por UHECR típico.

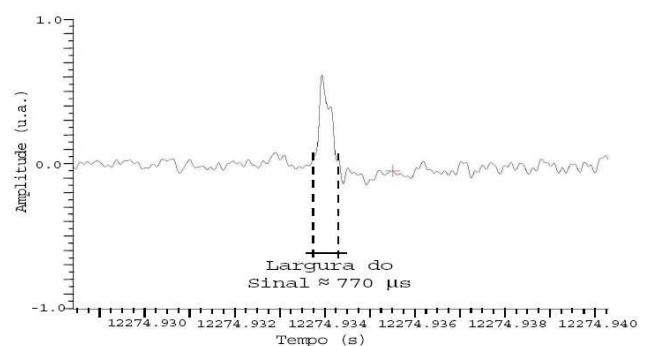


FIG. 3: Sinal de raio cósntico detectado pelo MARIACHI.

IV. DETECÇÃO POR FILTRAGEM ÓTIMA

Para aumentar a eficiência na detecção dos eventos de interesse, foram utilizados métodos estatísticos de detecção de sinais. Estes métodos, conhecidos como filtros-casados, são usados quando a relação sinal-ruído é baixa, mas se conhece a forma do sinal a ser detectado. Além disso, devido aos diversos tipos de eventos passíveis de serem observados, métodos simples de detecção, como detecção por patamar, por exemplo, não são suficientes, necessitando-se utilizar, em conjunto, técnicas de classificação de sinais. Filtros-casados, no entanto, além de maximizar a eficiência de detecção, também são excelentes métodos lineares de classificação [4].

Uma abordagem *offline* de filtro-casado para sinais determinísticos foi implementada para detecção de raios cósmicos em dados coletados com o sistema de aquisição do MARIACHI. Antes da apresentação destes resultados, uma introdução à técnica de filtro-casado é feita a seguir.

A. Detecção de Sinais

Dado um sinal discreto $s[k]$, de N amostras, a ser transmitido por um meio qualquer que introduza um ruído aditivo, deseja-se determinar, com a melhor eficiência possível, a presença deste sinal. Em outras palavras, um processamento deve ser feito de modo a decidir entre duas hipóteses possíveis: de somente o ruído estar presente (chamada de hipótese H_0) ou de termos o sinal $s[k]$ desejado mais o ruído aditivo (hipótese H_1). A função densidade de probabilidade (f.d.p) $n[l]$ do ruído é conhecida. Obviamente, a decisão a favor de H_0 ou H_1 deve ser baseada na hipótese que tenha maior probabilidade para um determinado segmento de N amostras observado. Esta decisão pode ser resumida pela equação

$$\frac{P(H_1|I)}{P(H_0|I)} \stackrel{H_1}{\gtrless} 1 \quad (1)$$

onde $P(H_1|I)$ e $P(H_0|I)$ são as probabilidades de ter ocorrido as hipóteses H_1 e H_0 , respectivamente. A Equação 1 é interpretada da seguinte forma: decide-se por H_1 se a razão das probabilidades $P(H_1|I)$ e $P(H_0|I)$ for maior que 1, caso contrário, decide-se por H_0 . Usando a regra de Bayes para

probabilidades condicionais

$$P(H_i|\mathbf{l}) = \frac{f_{\mathbf{l}|H_i}(\mathbf{l}|H_i)P(H_i)}{f_{\mathbf{l}}(\mathbf{l})} \quad (2)$$

temos

$$\frac{P(H_1)f_{\mathbf{l}|H_1}(\mathbf{l}|H_1)}{P(H_0)f_{\mathbf{l}|H_0}(\mathbf{l}|H_0)} \stackrel{H_1}{\gtrless} \stackrel{H_0}{1} \quad (3)$$

ou

$$\frac{f_{\mathbf{l}|H_1}(\mathbf{l}|H_1)}{f_{\mathbf{l}|H_0}(\mathbf{l}|H_0)} \stackrel{H_1}{\gtrless} \stackrel{H_0}{\frac{P(H_0)}{P(H_1)}} \quad (4)$$

A fração do lado esquerdo da Equação 4 é chamada de *razão de semelhança* e é a equação base da teoria de detecção e estimativa de sinais.

Em alguns casos, pode-se fazer a constante do lado direito da Equação 4 variar, dependendo dos custos impostos por se decidir erroneamente por uma das duas hipóteses. A forma mais geral de decisão é dada, então, por

$$\frac{f_{\mathbf{l}|H_1}(\mathbf{l}|H_1)}{f_{\mathbf{l}|H_0}(\mathbf{l}|H_0)} \stackrel{H_1}{\gtrless} \stackrel{H_0}{\gamma} \quad (5)$$

A Figura 4 ilustra, de forma mais clara, as consequências desta equação. O eixo horizontal corresponde ao valor da razão de semelhança obtido e o eixo vertical é a probabilidade dado que uma das duas hipóteses ocorreu. A área hachurada à direita do patamar de decisão γ é a probabilidade de se decidir por H_1 quando, na verdade, a hipótese ocorrida foi H_0 . Esta é conhecida como *probabilidade de falso alarme* (P_f) e é dada pela integral

$$P_f = \int_{\gamma}^{+\infty} f_{\mathbf{l}|H_0}(\mathbf{l}|H_0) d\mathbf{l} \quad (6)$$

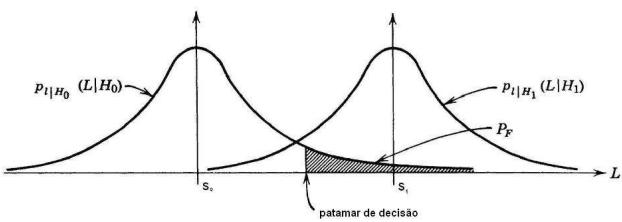


FIG. 4: p.d.f.s da razão de semelhança dado que H_0 ou H_1 ocorreu.

Da mesma forma, pode-se definir a *probabilidade de detecção* de um sinal (P_d) como

$$P_d = \int_{\gamma}^{+\infty} f_{\mathbf{l}|H_1}(\mathbf{l}|H_1) d\mathbf{l} \quad (7)$$

O valor do patamar de decisão γ dependerá da relação entre P_f e P_d desejada. Variando-se γ de $-\infty$ a $+\infty$, pode-se gerar um gráfico de $P_f \times P_d$ conhecido como curva ROC (*Receiver Operating Characteristic*), como aquele ilustrado na Figura 5. A curva ROC mostra de forma sucinta a eficiência

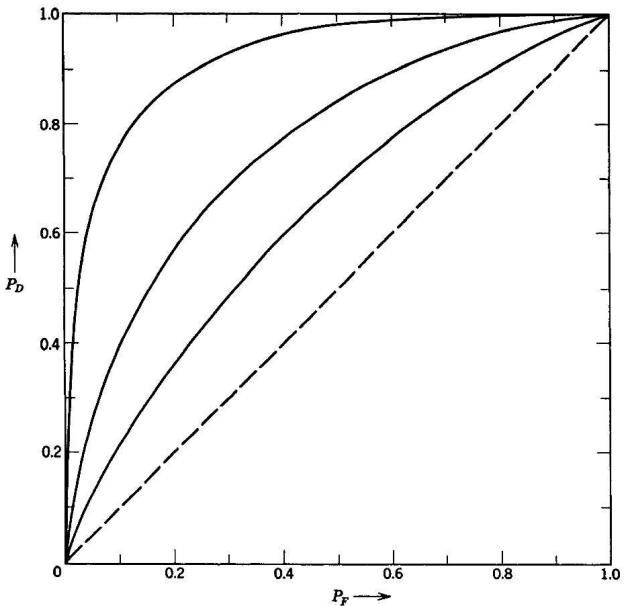


FIG. 5: Curva ROC.

de detecção. Quanto menor o raio de curvatura deste gráfico, melhor é a relação sinal-ruído e, consequentemente, melhor é a seletividade no processo de detecção.

Se o ruído aditivo for branco (amostras descorrelacionadas) e gaussiano, as amostras serão estatisticamente independentes e a razão de semelhança será dada pela razão entre os produtórios das probabilidades individuais de cada amostra

$$\frac{\prod_{i=1}^N f_{l_i|H_1}(l_i|H_1)}{\prod_{i=1}^N f_{l_i|H_0}(l_i|H_0)} \stackrel{H_1}{\gtrless} \stackrel{H_0}{\gamma} \quad (8)$$

Supondo-se o ruído gaussiano e de média zero, temos

$$\frac{\prod_{i=1}^N \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \exp\left\{-\frac{(l_i - s[i])^2}{2\sigma^2}\right\}}{\prod_{i=1}^N \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \exp\left\{-\frac{l_i^2}{2\sigma^2}\right\}} \stackrel{H_1}{\gtrless} \stackrel{H_0}{\gamma} \quad (9)$$

Tirando o logaritmo e rearrumando em notação vetorial, temos

$$\mathbf{l}^T \mathbf{s} \stackrel{H_1}{\gtrless} \stackrel{H_0}{\gamma} \sigma^2 \ln \gamma + \frac{1}{2} (\mathbf{s}^T \mathbf{s}) \quad (10)$$

As parcelas à direita da inequação acima são valores constantes e podem ser absorvidos por um valor de patamar γ' . Deste modo, a Equação 10 se torna

$$\mathbf{l}^T \mathbf{s} \stackrel{H_1}{\gtrless} \stackrel{H_0}{\gamma'} \quad (11)$$

Esta equação mostra que se o ruído for gaussiano e branco, a decisão entre H_0 e H_1 é dada pelo produto interno entre o sinal recebido e uma cópia do sinal a ser detectado. O resultado deste produto é comparado com um valor de patamar que dependerá da relação entre a probabilidade de falso alarme P_f

e a probabilidade de detecção P_d desejadas. Devido à filosofia utilizada, este método é comumente chamado de filtro-casado.

O processo de detecção pode ser esquematizado na forma de diagrama em blocos (Figura 6). Deste modo, fica evidente que o filtro-casado é formado por um bloco linear que tenta, a partir do conhecimento prévio do sinal a ser detectado, melhorar a relação sinal-ruído antes da aplicação de um patamar de decisão. Pode-se mostrar que este processo não apenas melhora, mas sim, maximiza esta relação [5], otimizando assim a eficiência de detecção. O filtro-casado é, por este motivo, denominado de um filtro ótimo.

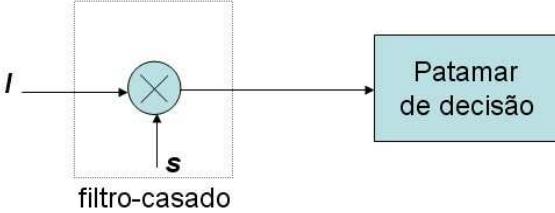


FIG. 6: Diagrama em blocos de um filtro-casado.

B. Dados experimentais - Análise do ruído

A Figura 7 mostra, com grande ampliação da escala vertical, um sinal digitalizado pelo *hardware* de aquisição de dados do MARIACHI, onde, para fins práticos, aceita-se que esteja presente somente o ruído do detector. Um ajuste gaussiano aplicado ao histograma feito a partir destas amostras (Figura 8) não apresenta um nível de confiança aceitável, porém, para uma primeira aproximação, o ruído pode ser considerado como tal, de modo a se utilizar a técnica de filtro-casado apresentada na seção anterior.

Várias amostras de ruído de mesma largura foram tomadas e, a partir delas, foi extraída a matriz de autocovariância do ruído, representada na Figura 9 por uma imagem de escala de cinzas. Esta matriz não é perfeitamente diagonal, apresentando algumas raias não nulas de fraca intensidade, ou seja, o ruído do detector não é totalmente branco. Devido a grande intensidade da linha diagonal em relação aos outros pontos da matriz, o ruído pode ser considerado branco, para uma primeira aproximação, e a técnica de filtro-casado pode ser utilizada.

C. Dados experimentais - Sinais de raios cósmicos

Por ainda não existir um modelo teórico para a forma do sinal $s[k]$ de um raio cósmico a ser detectado com o MARIACHI, este deve ser estimado a partir de dados reais. Desta forma, foi feito um recorte manual de supostos sinais de raios cósmicos em um conjunto de dados de uma hora consecutiva de aquisição. Algumas limitações são evidentes neste processo de seleção:

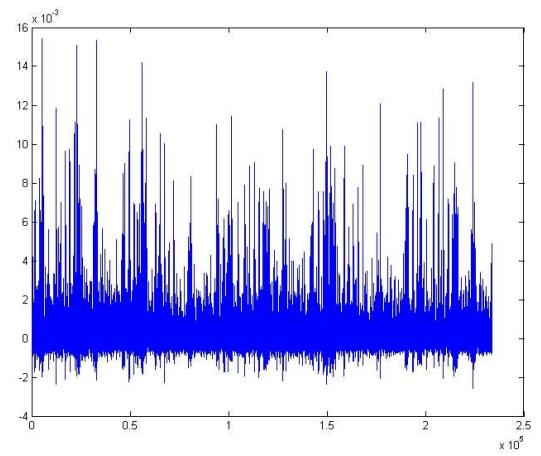


FIG. 7: Ruído do detector do MARIACHI.

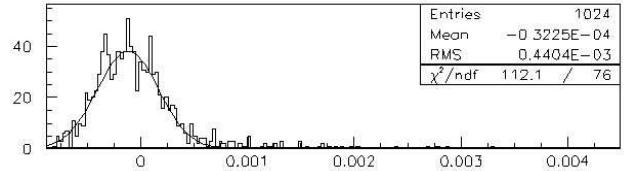


FIG. 8: Ajuste gaussiano aplicado ao histograma de ruído do MARIACHI.

1. Os sinais de cósmicos selecionados contêm também a informação do ruído.
2. O recorte manual só permite a seleção de sinais com uma boa relação sinal-ruído.
3. O caráter estocástico do sinal de cósmico dificulta a detecção de eventos válidos.

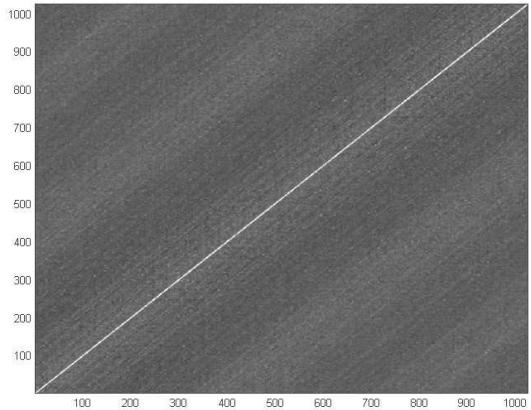


FIG. 9: Matriz de autocovariância do ruído do detector do MARIACHI.

Para minimizar as limitações impostas pelos ítems 1 e 3, $s[k]$ foi escolhido tomando-se a média ponto a ponto dos sinais de cósmicos selecionados. Desta forma, o ruído aditivo é fortemente suprimido e a característica estocástica dos sinais pode ser ignorada, para uma primeira análise, de modo a usarmos a técnica de detecção para sinais determinísticos apresentada neste texto. Devido ao item 2, espera-se um filtro-casado com uma seletividade superior ao caso real, devido a alta relação sinal-ruído dos sinais selecionados.

D. Resultados

O sinal a ser casado pelo filtro foi aproximado fazendo-se uma média ponto a ponto de 450 sinais de raios cósmicos adquiridos com o detector. Devido à largura típica de um sinal de cósmico gerado no MARIACHI e à taxa de amostragem do sistema digitalizador, o número de amostras por sinal é de 36. Estes sinais de raios cósmicos juntamente com 3.732 sinais de ruído, com o mesmo número de amostras, foram passados pelo filtro-casado feito com este sinal médio. Os histogramas dos valores de saída do filtro, para cada conjunto (sinal e ruído), são mostrados na Figura 10. A Figura 11 apresenta a curva ROC correspondente. Esta curva mostra que o filtro apresentou uma seletividade muito alta, com 99% de probabilidade de detecção, exibindo uma probabilidade de falso alarme de apenas 0,5%.

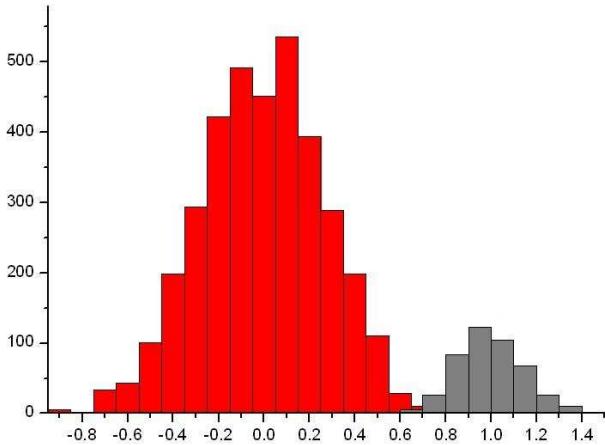


FIG. 10: PDFs das saídas do filtro-casado projetado para detecção de raios cósmicos no MARIACH.

V. CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS

Neste trabalho, foi proposto um filtro-casado para detecção de raios-cósmicos no contexto do projeto MARIACHI. Como esperado, devido à boa relação sinal-ruído dos dados selecionados, o filtro mostrou-se bem seletivo, com uma eficiência de 99% para uma probabilidade de falso alarme de 0,5%. Uma coincidência com cintiladores está sendo desenvolvida para aquisição de um conjunto mais realista de eventos

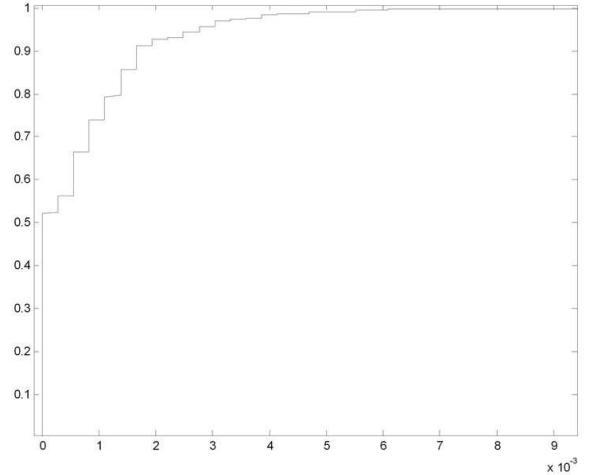


FIG. 11: Curva ROC resultante do filtro-casado aplicado ao dados do MARIACHI para detecção de raios cósmicos.

válidos. Neste ponto, a generalização para um filtro estocástico e um estágio de branqueamento do ruído [5] podem ser implementados para aumentar a eficiência da detecção.

Uma abordagem *on-line* da técnica de detecção apresentada acima está sendo projetada. Esta detecção automática de eventos será fundamental para reduzir drasticamente a quantidade de dados armazenados em mídia permanente para posterior análise *offline*.

VI. AGRADECIMENTOS

Às Instituições de apoio à pesquisa CNPq, CAPES e FAPERJ e também ao Dr. Denis Damazio, colaborador do projeto.

-
- [1] <http://cosmicray.bnl.gov/>.
[2] JACKSON, J. D., *Classical Electrodynamics*. John Wiley, Sons, Inc., New York, 1962.
[3] <http://www2.bnl.gov/damazio/log/>.
[4] K. SAM SHAMUGAN, A. B., *Random Signals - detection, estimation and data analysis*. Wiley, 1988.

- [5] TREES, H. L. V., *Detection, Estimation, and Modulation Theory, Part I*. Wiley, 2001.