

Um Novo Método de Classificação de Sinais quanto ao Tipo de Modulação

Bruno Cosenza de Carvalho e Jacques Szczupak

Resumo—Este trabalho apresenta uma nova abordagem na classificação de sinais e reconhecimento de tipos de modulação analógica. O método proposto está baseado na análise de comportamento dos autovalores e autovetores obtidos da decomposição de uma matriz de dados construída com amostras de sinal. Também são apresentados alguns resultados e comparados com outro método conhecido.

Palavras-Chave—Modulação analógica, classificação de sinais, reconhecimento de tipos de modulação.

Abstract—This work presents a new approach in signal classification and analog modulation recognition. The method proposed is based on the behavior analysis of eigenvalues and eigenvectors obtained from a data matrix decomposition, built with signal samples. Also, some results are presented and compared with other known method.

Index Terms— Analog modulation, signal classification, modulation recognition.

I. INTRODUÇÃO

O principal objetivo deste trabalho é apresentar uma contribuição referente à classificação de sinais quanto ao tipo de modulação analógica. Sistemas desta natureza são geralmente utilizados em equipamentos de varredura do espectro eletromagnético. O objetivo deste tipo de varredura seria a busca de alguma forma inteligível de comunicação ou de interferências. Com isto é possível controlar as emissões e avaliar a qualidade das mesmas. O procedimento de classificação de sinais quanto ao tipo de modulação também pode ser empregado nos denominados rádios receptores de multidemodulação. Neste tipo de rádio, pode-se introduzir um estágio anterior ao bloco responsável pela demodulação. Este novo estágio poderia ser o responsável pela classificação dos sinais recebidos quanto ao tipo de modulação. Uma vez classificado o sinal, o bloco seguinte teria seus parâmetros ajustados para a demodulação correta deste sinal. Para receptores digitais, por exemplo, alterar algum parâmetro do demodulador implica simplesmente numa mudança de subrotina.

O algoritmo proposto neste trabalho utiliza uma árvore de decisão que emprega como parâmetros de comparação e teste de hipóteses, as informações contidas nos autovalores e autovetores obtidos na decomposição de uma matriz de dados.

Bruno Cosenza de Carvalho, Grupo de Tecnologia da Informação, Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento, Rio de Janeiro, Brasil, E-mail: cbruno@ipd.eb.mil.br.

Jacques Szczupak, Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro e Engenho, Rio de Janeiro, Brasil, E-mail: jsz@uol.com.br

A matriz de dados será construída a partir da amostragem de um determinado sinal modulado corrompido por ruído. A técnica empregada, tanto para a elaboração da matriz de dados quanto para a decomposição desta matriz pode ser observada em [1] e [2].

Um outro fato observado está relacionado à matriz de dados ser originada a partir da amostragem de um sinal modulado. Este tipo de matriz apresenta uma característica de matriz circulante [2,3]. Esta característica será explorada neste trabalho.

Dentre as modulações analógicas existentes, o classificador proposto deverá ser capaz de classificar os seguintes tipos:

- AM: amplitude modulada com as duas bandas laterais (*dual side band*) e portadora.
- AM-SC: amplitude modulada com as duas bandas laterais e sem portadora (*supressed carrier*)
- AMUSB: amplitude modulada com a banda lateral superior (*upper side band*) e sem portadora
- AMLSB: amplitude modulada com a banda lateral inferior (*lower side band*) e sem portadora
- FM: frequência modulada
- PM: fase modulada

Por fim, serão apresentados resultados experimentais para comparação com os demais resultados disponíveis nas referências.

II. LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO

Dentre os artigos de classificação de sinais de comunicação quanto ao tipo de modulação, destacam-se os publicados por Azzouz e Nandi [4,5,6]. De um modo geral, outras publicações [7,8,9] limitam-se a classificar alguns poucos tipos de modulações.

A primeira proposta de Azzouz e Nandi foi classificar os sinais quanto à modulação analógica [4]. A segunda proposta apresentada foi a classificação de sinais com modulações digitais [5]. Na terceira foi utilizado um método de classificação baseado em uma rede neural artificial (RNA) para classificar, no mesmo sistema, tanto as modulações digitais quanto as analógicas [6].

Os resultados obtidos neste trabalho serão comparados com os resultados alcançados por Azzouz e Nandi para a classificação de modulações analógicas [4]. Algumas modulações analógicas classificadas por Azzouz e Nandi foram excluídas deste trabalho, mas, mesmo assim, serviram como uma boa base de comparação. As modulações utilizadas por Azzouz e Nandi foram: AM, AM-SC, AMUSB, AMLSB, FM, AMVSB (AM com banda lateral vestigial) e COMB (combinada AM/FM).

A árvore de decisão proposta por Azzouz e Nandi para a classificação quanto à modulação analógica está apresentada

na Fig. 1. Observando mais atentamente esta árvore, nota-se a necessidade do levantamento de alguns parâmetros do sinal modulado. Os parâmetros utilizados foram os seguintes:

- g_{\max} - pico da densidade espectral de potência. Ele é utilizado para identificar se um sinal está modulado em FM ou não.
- s_{ap} - o desvio padrão do valor absoluto da componente não linear da fase instantânea. Ele é utilizado para separar os sinais modulados em AM, AM-SC e AMVSB dos modulados em AMLSB, AMUSB e Comb.
- s_{dp} - o desvio padrão da componente não linear da fase instantânea. Ele é utilizado para separar a modulação AM da AM-SC e AMVSB
- P - simetria do espectro. Ele é utilizado para dimensionar o grau de assimetria nos espectros dos sinais modulados. Os parâmetros PL e PU são a largura do espectro inferior e superior à portadora respectivamente, e P é definido como:

$$P = \frac{|PL - PU|}{PL + PU} \quad (1)$$

- $t_p, tg_{\max}, ts_{ap}, ts_{dp}$ - são limiares de comparações obtidos por meio de várias simulações. A letra t está associada ao termo em inglês *threshold*.

Os parâmetros obtidos no método de Azzouz e Nandi necessitam muitas vezes de um levantamento estatístico apurado. Algumas considerações devem ser feitas para que as medições destes parâmetros, em condições reais de uso, resultem em uma boa estimativa. Como exemplo, pode-se citar a estimativa dos parâmetros associados à largura do espectro (P, PL e PU). A medição destes parâmetros não é algo tão imediata. Geralmente é preciso processar várias janelas de amostragem do sinal para se conseguir uma boa estimativa do espectro.

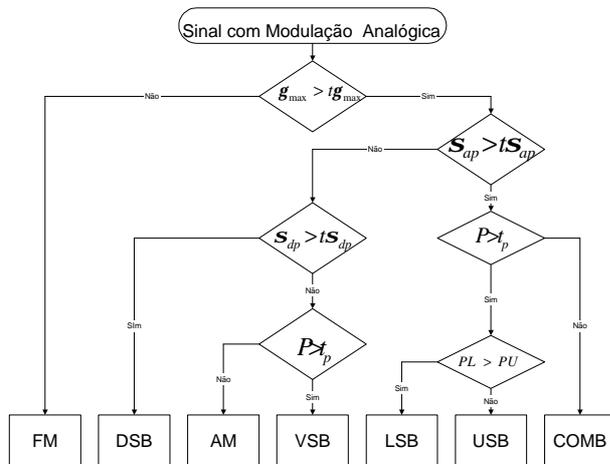


Fig. 1 - Árvore de decisão empregada por Azzouz e Nandi para a classificação de sinais quanto ao tipo de modulação analógica.

Observa-se que, numa situação real, deve-se evitar a medição de fase do sinal em regiões próximas ao nível 0 de tensão, pois toda a medida fica comprometida devido à presença relativamente intensa de ruído nesta região. Portanto, deve-se considerar somente as medidas acima e abaixo de determinado nível do sinal. Na prática, este nível é obtido experimentalmente e seu valor pode variar ao longo do tempo.

Na próxima seção será descrita a arquitetura de *hardware* onde o algoritmo de classificação de sinais quanto ao tipo de modulação atua. Algumas características desta arquitetura possibilitam um bom desempenho com o novo algoritmo proposto em [2].

III. ARQUITETURA PROPOSTA PARA A CLASSIFICAÇÃO

A Fig. 2 exibe a arquitetura empregada no classificador de sinais quanto ao tipo de modulação. O sinal de rádio frequência (RF) é recebido pela antena receptora. Logo após, este sinal é encaminhado, por meio de um distribuidor de sinais de RF, para dois rádios receptores. Pelo diagrama apresentado, percebe-se a existência de dois caminhos distintos para o sinal: um com o objetivo de processar sinais de banda larga e outro para processar sinais de banda estreita. Em cada ramo destes encontra-se um rádio que irá disponibilizar na saída um sinal modulado na frequência intermediária (FI), respectivamente. Geralmente, esta frequência intermediária costuma ser de 10,7 ou 21,4MHz. Este sinal modulado em FI é digitalizado por meio dos conversores analógico/digitais. Logo em seguida, o sinal digitalizado entra num conversor de frequência (DDC – *digital down converter*) que possui a capacidade de deslocar a portadora para uma frequência desejada ou até mesmo eliminá-la. A eliminação da portadora neste processo caracteriza a própria demodulação. O passo seguinte é resolvido pelo processador digital de sinais (DSP – *digital signal processor*) que será responsável pelo processamento dos algoritmos de decomposição da matriz de dados e pela classificação do sinal.

Os DSP's são conectados a um barramento local rápido onde ocorre a troca de informações entre os processadores. Existe também, um computador do tipo PC conectado neste mesmo barramento interno, o qual faz a ligação do sistema com o mundo exterior (por exemplo, por meio de uma rede local). Este computador do tipo PC também faz o papel de interface com o usuário. Ele disponibiliza os resultados obtidos pelo processamento através de suas unidades de entrada e saída (vídeo, disco, rede, etc...).

Na próxima seção, será apresentado um novo método de classificação de sinais quanto ao tipo de modulação e também serão definidos os novos parâmetros utilizados na árvore decisão proposta.

IV. UM NOVO MÉTODO DE CLASSIFICAÇÃO

O novo método deverá possuir parâmetros de mais fácil obtenção do que aqueles propostos por Azzouz e Nandi. A ideia inicial deste novo método foi proposta, porém não implementada, por Cohen [10].

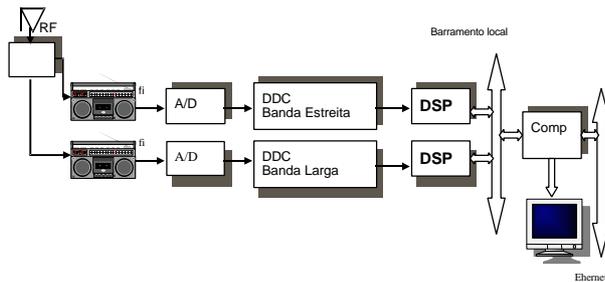


Fig. 2 - Arquitetura empregada no classificador

A idéia principal é trabalhar com os valores singulares resultantes da decomposição da matriz de dados obtida por meio da amostragem de um sinal modulado. Estes valores singulares serão os novos parâmetros utilizados durante o processo de classificação. Se forem utilizados os algoritmos convencionais de decomposição da matriz de dados para obtenção destes parâmetros, este método apresentará fortes restrições para emprego em tempo real. Isto ocorre devido à grande quantidade de cálculos necessários para elaboração da decomposição da matriz de dados. Uma das soluções para este problema seria aplicar o algoritmo desenvolvido por Carvalho e Szczupak [1,2], para decomposição da matriz de dados, cuja discussão não faz parte do escopo deste trabalho.

Para o método de classificação propriamente dito, foram utilizados como parâmetros principais de decisão, durante a classificação, as distâncias Euclidianas entre vetores. A distância deverá ser medida entre o vetor formado pelos valores singulares decompostos da matriz de dados de um sinal modulado corrompido por ruído e um vetor formado pela média dos valores singulares decompostos da matriz de dados de um sinal modulado sem a presença do ruído. Este vetor médio foi obtido por meio de vários ensaios realizados para cada tipo de modulação. Portanto, as medidas das distâncias devem ser realizadas a cada nova matriz de dados. Estas distâncias devem ser utilizadas como parâmetros na nova árvore de decisão proposta. Com este procedimento, torna-se desnecessário o levantamento estatístico de parâmetros complexos, como aqueles apresentados por Azzouz e Nandi e apresentados na Figura 1.

É importante ressaltar que o procedimento de classificação não usa como parâmetros somente os valores singulares da matriz de dados. Na próxima seção serão apresentados outros parâmetros igualmente necessários para um bom desempenho do classificador.

V. VALORES SINGULARES COM COMPORTAMENTOS SEMELHANTES

Um sinal com modulação analógica contém uma forte componente cíclica que é a portadora [2]. Em geral, a matriz de dados construída com amostras deste sinal modulado apresenta muitos ciclos da portadora na janela de amostragem. Considerando a definição de matriz circulante [3], pode-se afirmar que matriz de dados apresenta características que a aproximam de uma matriz circulante [2]. Portanto, uma análise em frequência do autovetor associado

ao maior autovalor da matriz de dados trará informações relevantes sobre o comportamento da portadora presente no sinal modulado. Pode-se saber, por exemplo, se houve ou não algum deslocamento em frequência da portadora.

O gráfico da Figura 3 apresenta o comportamento do autovetor associado ao maior autovalor da matriz de dados de um sinal modulado simulado em AMUSB. É possível observar a existência de uma frequência predominante no gráfico. Para o caso de uma modulação AMUSB, a portadora deverá, na maioria dos casos (pois o sinal encontra-se corrompido pelo ruído), apresentar um deslocamento para uma frequência acima da frequência central. Pela arquitetura proposta na Fig. 2, a frequência central é a frequência intermediária (FI), bem conhecida no sistema de classificação.

Para o caso da distinção entre FM e PM utilizou-se o mesmo método, isto é, avaliar o comportamento em frequência do autovetor associado ao maior autovalor da matriz de dados. Observou-se, experimentalmente, que a frequência predominante do autovetor associado a um sinal modulado em frequência tende a se afastar mais da frequência da portadora (FI) do que a frequência predominante do autovetor da matriz de dados associada a um sinal modulado em fase.

Na próxima seção será apresentada a nova árvore de decisão proposta e serão descritos os parâmetros utilizados por esta nova árvore.

VI. A NOVA ÁRVORE DE DECISÃO

Os parâmetros adotados pelo algoritmo utilizado na nova árvore de decisão foram, principalmente, distâncias Euclidianas associadas aos autovalores das matrizes de dados obtidas pela amostragem do sinal modulado. Além destas distâncias, em algumas fases o algoritmo analisa o comportamento em frequência do autovetor associado ao maior autovalor da matriz de dados. A Figura 4 exibe a nova árvore de decisão utilizando estes novos parâmetros.

Na árvore da Figura 4 foi incluída uma nova categoria denominada de não classificada (NC) para os casos em que o algoritmo não consiga classificar o tipo de modulação.

Os parâmetros utilizados na nova árvore de decisão são os seguintes:

- F - frequência do autovetor associado ao maior autovalor
- FI - frequência intermediária
- d_{AM} - distância entre os autovalores do sinal de entrada e os do banco de dados associados à modulação AM
- $d_{FM/PM}$ - distância entre os autovalores do sinal de entrada e os do banco de dados associados às modulações FM e PM
- d_{AMSC} - distância entre os autovalores do sinal de entrada e os do banco de dados associados à modulação AM-SC
- d_{AM} - distância entre os autovalores do sinal de entrada e os do banco de dados associados à modulação AM
- d_{AMUSB} - distância entre os autovalores do sinal de entrada e os do banco de dados associados à modulação AMUSB
- d_{AMLSB} - distância entre os autovalores do sinal de entrada e os do banco de dados associados à modulação AMLSB

- d_{PM} - distância entre os autovalores do sinal de entrada e os do banco de dados associados à modulação PM
- d_{FM} - distância entre os autovalores do sinal de entrada e os do banco de dados associados à modulação FM

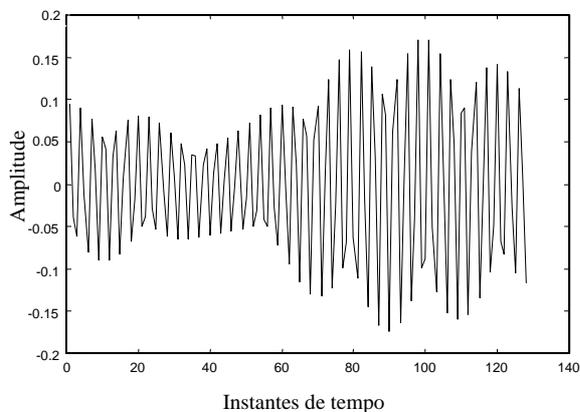


Fig. 3 - O comportamento do autovetor associado ao maior autovalor da matriz de dados do sinal com modulação AMUSB

Para iniciar o processo de classificação é necessário primeiramente montar um banco de dados onde ficam guardados os valores médios dos elementos do vetor composto pelos autovalores associados a cada tipo de modulação. Posteriormente são feitas medidas de distâncias entre um determinado vetor do banco de dados e o obtido pela decomposição da matriz de dados em um determinado instante. Desta forma alimenta-se a árvore de decisão com os parâmetros necessários para efetuar a classificação.

O algoritmo utilizado para obtenção da frequência predominante dos autovetores foi a FFT. Para uma maior eficiência e precisão na medição aconselha-se o uso de algoritmos mais recentes de medição de frequência instantânea [10,11].

Alguns resultados experimentais foram obtidos utilizando-se este novo método de classificação proposto. Eles serão devidamente apresentados na próxima seção.

VII. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Para efetuar uma análise comparativa utilizou-se o mesmo método de geração da seqüência do sinal modulante $\{x_m(i)\}$ proposto por Azzouz e Nandi [4]. Esta seqüência foi obtida a partir de uma equação diferença, representando o modelo auto-regressivo

$$x_m(i) = \mathbf{r}x_m(i-1) + n(i), \quad x_m(0) = 0 \quad (2)$$

onde $n(i)$ é uma seqüência de média zero e uniformemente distribuída no intervalo $[-0,25, 0,25]$. Foram atribuídos valores para $\mathbf{r} = 0,985$, uma taxa de 476250 amostras/s e frequência da portadora de 150KHz. O sinal modulante também passa através de um filtro passa baixas com frequência de corte em 8KHz.

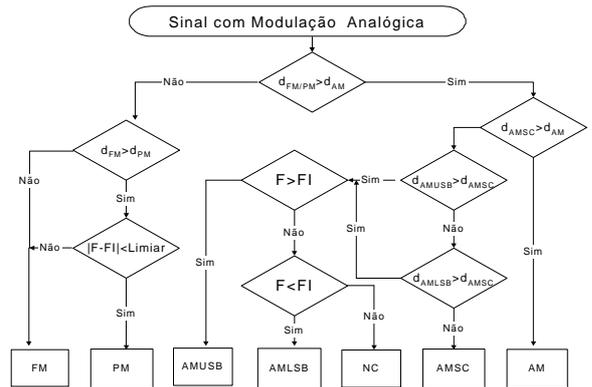


Fig. 4 - A nova árvore de decisão proposta para classificação de sinais com modulação analógica

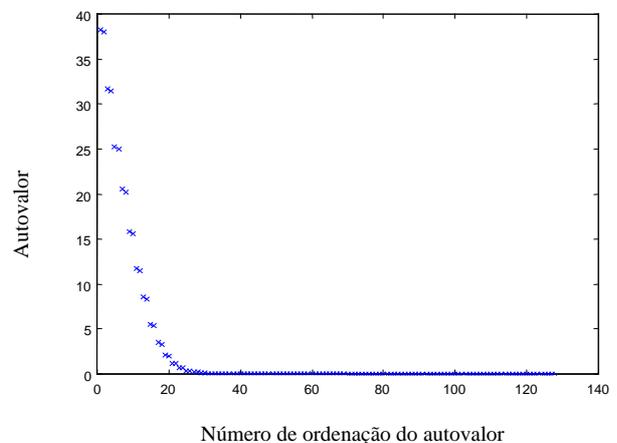


Fig. 5 - Valores médios dos autovalores para a modulação FM

Foi adicionado ruído branco Gaussiano aos sinais modulados. O objetivo era obter uma RSR de 15dB, compatível com os experimentos descritos nas referências [4,5,6,7].

O método proposto, além de trabalhar com poucas amostras (o tamanho das janelas de amostragem foi de 128 amostras contra as 2048 necessárias no método de Azzouz e Nandi), não necessita de maiores preocupações quanto ao nível do sinal amostrado.

O modo escolhido de exibição dos resultados foi o histograma. O histograma possui um aspecto dinâmico de apresentação de resultados. Ao mesmo tempo, ele é capaz de manter informações sobre um passado recente evidenciando tendências do comportamento do sinal.

Conhecendo-se a frequência da portadora (FI) e a taxa de amostragem decidiu-se trabalhar com matrizes de dados com dimensões 128x128. O comportamento gráfico dos valores decompostos de uma matriz de dados associada a um sinal com modulação FM pode ser observado na Figura 5.

O sinal de banda mais larga utilizado nesta classificação foi o modulado em FM. Portanto, optou-se em armazenar, para efeito de cálculo das distâncias euclidianas, apenas os 20 maiores valores decompostos de cada modulação. A Figura 5 mostra claramente que, para este tipo de sinal, somente os 20

primeiros autovalores possuem relevância.

A Figura 6 apresenta uma situação instantânea do histograma para um dos diferentes tipos de modulações testados. O limite de contagem adotado no histograma foi 128. As raias previstas nos histogramas estão disponíveis da esquerda para direita na seguinte ordem: AM, AMLSB, AMSC, AMUSB FM e PM. As figuras 7, 8, 9, 10, 11 e 12 mostram o comportamento dos histogramas ao longo de todo o processo de amostragem e classificação. Analisando os gráficos de comportamento dos histogramas é possível observar que, durante todo o processo de classificação, todas as hipóteses foram consideradas, conforme as legendas anexas aos gráficos. Pode ser observado o elevado grau de acerto para todos os tipos de modulações e somente durante determinados intervalos de tempo houve decisões erradas. Como era de se esperar, estes erros ocorreram somente entre modulações com características semelhantes, o que comprova o bom desempenho do algoritmo. Observou-se, para os casos estudados, que somente durante classificação dos sinais FM e PM houve um erro de decisão no início do gráfico (Figura 12) provocada pela grande semelhança entre os parâmetros para estes tipos de modulação e pela pouca quantidade de amostras.

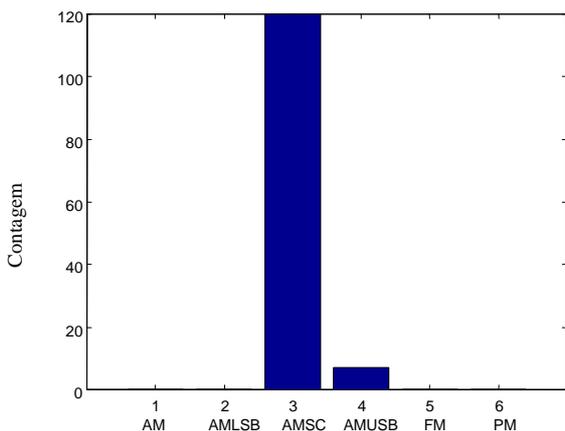


Fig. 6 - Histograma em um determinado instante para o sinal com modulação AM-SC

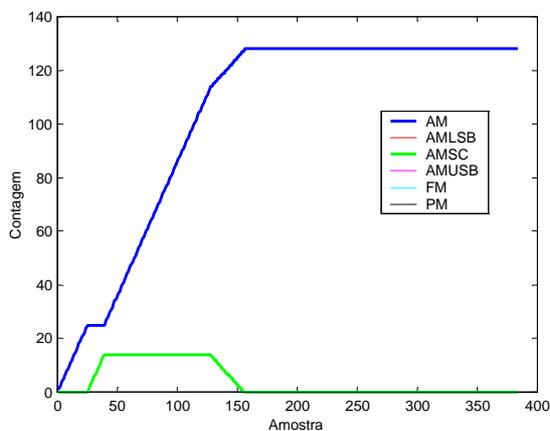


Fig. 7 - Comportamento do histograma ao longo do tempo para um sinal AM

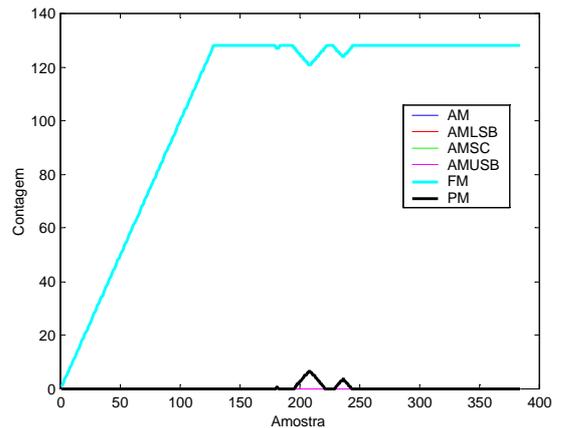


Fig. 8 - Comportamento do histograma ao longo do tempo para um sinal FM

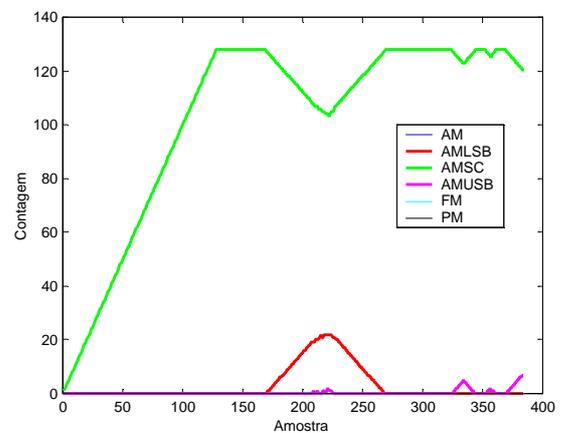


Fig. 9 - Comportamento do histograma ao longo do tempo para um sinal AM-SC

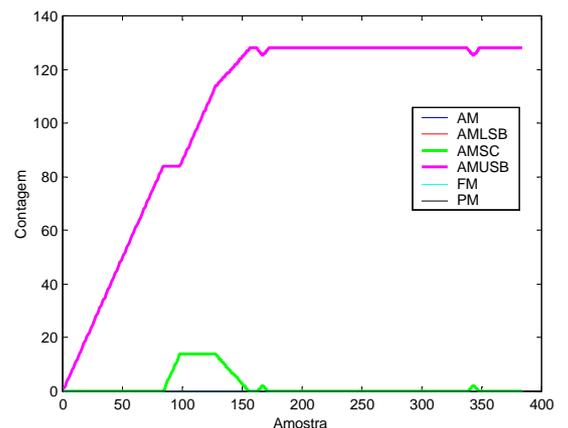


Fig. 10 - Comportamento do histograma ao longo do tempo para um sinal AMUSB

VIII. CONCLUSÕES

Foi apresentado um novo método de classificação de sinais quanto ao tipo de modulação analógica. O objetivo deste novo método era de conseguir melhorar o desempenho de procedimentos já conhecidos. Adotaram-se duas linhas de

ação no classificador. A primeira foi trabalhar com novos parâmetros de mais fácil obtenção. A segunda linha foi conseguir realizar a classificação com uma quantidade bem reduzida de amostras do sinal.

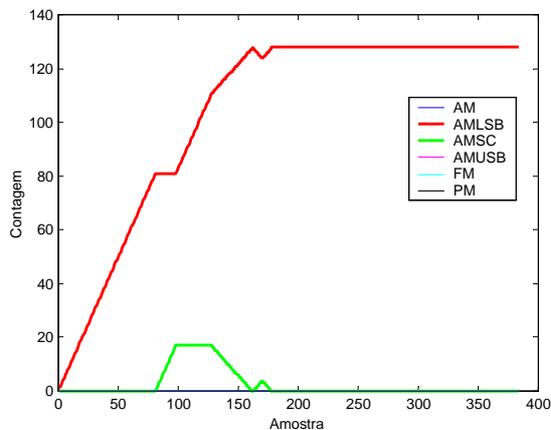


Fig. 11 - Comportamento do histograma ao longo do tempo para um sinal AMLSB

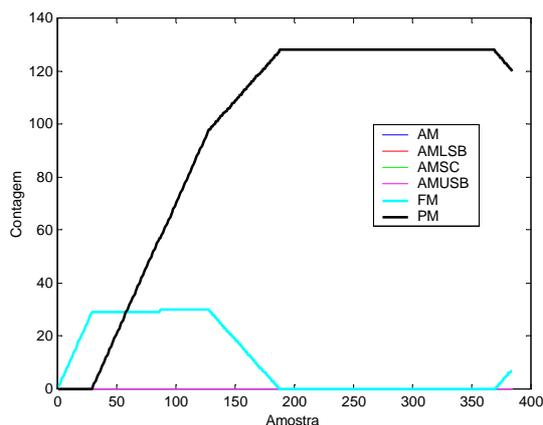


Fig. 12 - Comportamento do histograma ao longo do tempo para um sinal PM

Para uma análise comparativa dos resultados, considerou-se que uma mudança de decisão durante a classificação se torna efetiva quando uma raia do histograma ultrapassa, em contagem, alguma outra. A tabela I apresenta um resultado comparativo entre o método proposto (CS) e o de Azzouz e Nandi (AN), obedecendo-se à consideração citada. Não foram computados os resultados relativos a fase inicial durante o crescimento da matriz.

Foi comprovada a eficiência do método de classificação. Como conseqüência, foi possível a utilização do algoritmo de decomposição de matrizes proposto por Carvalho e Szczupak [1], que é capaz de calcular de modo eficiente os novos parâmetros (valores singulares) utilizados durante a classificação. Deste modo, o sistema de classificação apresentou resultados que o torna, dependendo do tipo de aplicação, apto para emprego em tempo real.

TABELA I
COMPARAÇÃO ENTRE TAXAS DE ACERTOS (%).
(NA – não avaliado)

	AM	AMSC	VSB	LSB	USB	COMB	FM	PM
AN	100	100	100	92,25	93,5	100	99	NA
CS	100	100	NA	100	100	NA	100	100

REFERÊNCIAS

- [1] Carvalho, B. C. and Szczupak, J. "A Fast Algorithm for Signal Subspace Tracking Based on The Jacobi Method", **International Telecommunications Symposium - ITS**, September 2002, Natal, RN, Brasil.
- [2] Carvalho, B. C., **Técnicas Aplicadas à Comunicação em Tempo Real e à sua Classificação**, Tese de Doutorado, DEE/PUC-Rio, 2002.
- [3] Golub, G. H. and Loan, C. F. V. **Matrix Computations**, The John Hopkins University Press, Baltimore, MD, third edition, 1996
- [4] Nandi, A. K. and Azzouz, E. E. "Automatic Analog Modulation Recognition", **Signal Processing** Vol. 46, 1995, pp. 211-222
- [5] Nandi, A. K. and Azzouz, E. E. "Automatic Identification of Digital Modulation Types", **Signal Processing** Vol 47, 1995, pp. 55-69
- [6] Nandi, A. K. and Azzouz, E. E. "Algorithms for Automatic Modulation Recognition of Communication Signals", **IEEE Trans. on Communications**, Vol 46, No 4, April 1998, pp. 431-436.
- [7] Al-Jalili, Y. O. "Identification Algorithm of Upper Sideband and Lower Sideband SSB Signals", **Signal Processing** Vol 42, 1995, pp. 207-213
- [8] Jondral, F. "Automatic Classification of High Frequency Signals", **Signal Processing** Vol 9, 1985, pp. 177-190
- [9] Soliman, S. S. and Hsue, S. -Z. "Signal Classification Using Statistical Moments", **IEEE Trans. on Communications**, Vol. 40, No. 5, May 1992, pp. 908-916.
- [10] Cohen, L. **Time Frequency Analysis**, Prentice Hall, Upper Side River, NJ, USA, 1996
- [11] Bastos, F. A. C. and Campos, M. L. R. "A New Method for Estimating the Instantaneous Frequency based on Maximum Likelihood", **ICASSP 2000**.