Projeto de constelações com símbolos não-equiprováveis adequadas ao sensoriamento espectral por características cicloestacionárias utilizando *Simulated Annealing*

Pedro T. V. de Souza, Vinicius S. V. de Souza, Aluísio I. R. Fontes, Luiz F. Q. Silveira

***Resumo*— O sensorimaneto de sinais por análise de características cicloestacionárias pode ser afetado pela probabilidade de ocorrência desses sinais. Este trabalho apresenta um método de projeto de constelações com probabilidade de símbolos não-equiprovaveis adequadas ao sensoriamento espectral utilizando análise de características cicloestacionárias. A constelação foi projetada através do algoritmo do *Simmulated Anneling* considerando a transmissão em canais com ruído AWGN. A constelação obtida foi avaliada em um cenário caracterizado por um ruído branco e comparada a uma constelação não otimizada. Foram obtidos resultados de taxa de deteção considerando uma probabilidade de falso alarme de 10%, conforme o padrão IEEE 802.22. Os resultados obtidos por simulação computacional indicam uma taxa de acerto superior na detecção dos sinais PSK oriundos de uma constelação otimizada, quando comparados a detecção de sinais de uma constelação PSK padrão, com pontos equi-espaçados.**

***Palavras-Chave*— Sensoriamento Espectral, Cicloestacionariedade, *Simmulated Anneling*, Rádio Cognitivo, Inteligência Artifical.**

***Abstract*— Spectral sensing by cyclostationary characteristics analysis can be affected by the probability of occurrence of these signals. This work presents a method of designing constellations with probability of non-equiprobable symbols suitable for spectral sensing using analysis of cyclostationary characteristics. The constellation was designed through the Simmulated Anneling algorithm considering the transmission in channels with AWGN noise. The constellation obtained was evaluated in a scenario characterized by white noise and compared to a non-optimized constellation. Detection rate results were obtained considering a false alarm probability of 10%, according to the IEEE 802.22 standard. The results obtained by computational simulation indicate a higher accuracy rate in the detection of PSK signals from an optimized constellation when compared to the detection of signals from a standard PSK constellation with equi-spaced points.**

***Keywords*— Spectral Sensing, Cyclostationary, Simmulated Anneling, Cognitive Radio, Artificial Intelligence.**

I. Introdução

O desenvolvimento e disseminação das tecnologias de comunicações sem fio fez com que o acesso ao espectro eletromagnético tenha se tornado cada vez mais crítico. Em particular, estudos científicos comprovaram que o problema de acesso ao espectro é mais significativo do que a escassez física desse recurso [1]. Diante disto, a comunidade científica, em conjunto com os órgãos reguladores, têm estudado uma política de alocação do espectro, chamada de acesso dinâmico ao espectro (*Dynamic Spectrum Access* - DSA) [2]. Neste novo contexto, o sistema de rádio deve ser capaz de detectar porções livres do espectro eletromagnético [3].

A detecção de porções livres do espectro por um sistema de rádio é denominado de sensoriamento espectral [4]. De forma geral, três métodos clássicos são definidos na literatura para o sensoriamento espectral: detecção por energia; por análise de características cicloestacionárias e por filtros casados [5].

Em particular, no sensoriamento por análise de características cicloestacionárias, a detecção do usuário primário é baseada em momentos estatísticos do sinal recebido [6]. Esse método de sensoriamento se configura como sendo o mais interessante em cenários caracterizados por uma baixa relação sinal ruído (*Signal-to-Noise Ratio* - SNR), além de não necessitar de nenhum conhecimento prévio dos sinais a serem sensoriados [5].

Recentemente, alguns trabalhos na literatura vêm analisando o desempenho da detecção por análise de cicloestacionariedades em diferentes abordagens de sensoriamento espectral.. Em [7], por exemplo, os autores utilizam Cadeias de Markov para classificar características obtidas a partir de medidas de cicloestacionaridade realizadas sobre sinais modulados. Em [2] é proposta uma técnica de sensoriamento realizada a partir de um limiar calculado por meio de funções resultantes de um processo de análise cicloestacionária. Em [8] utiliza-se uma Rede Neural Artificial (RNA) para, a partir de características cicicloestacionárias, classificar a modulação de sinais monitorados. Por fim, em [9], os autores propõem um sistema que inicialmente estima valores de funções cicloestacionárias sobre uma região de R^2 e utiliza tais valores para efetuar o sensoriamento de sinais transmitidos sobre porções do espectro eletromagnético.

Entretanto, a utilização de alguns subsistemas de transmissão, como codificação de canal e transmissão em múltiplas portadoras, podem gerar dificuldades relacionadas ao sensoriamento espectral [10], [11]. Conforme será demonstrado neste trabalho, existem dificuldades reais para a aplicação de técnicas de sensoriamento espectral por cicloestacionar-

Pedro Thiago Valério de Souza e Vinicius Samuel Valério de Souza Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Pau dos Ferros-RN, Brasil, E-mails: pedro.souza@ufersa.edu.br, viniciussamuel@ufersa.edu.br

Aluísio Igor Rêgo Fontes, Instituto Federal do Rio Grande do Norte, Pau dos Ferros-RN, Brasil, E-mail: aluisio.igor@gmail.com

Luiz Felipe de Queiroz Silveira, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal-RN, Brasil, E-mail: lfelipe@dca.ufrn.br.

iedades em sinais oriundos de constelações com símbolos não-equiprováveis. Essas dificuldades surgem devido a forma como os símbolos codificados podem ser modulados e transmitidos pelo canal de comunicações.

Desta maneira, neste trabalho, busca-se esquemas de modulação com constelações de símbolos não-equiprováveis a um cenário de comunicação caracterizado pelo acesso dinâmico ao espectro e sensoriamento espectral por análise de cicloestacionariedades. Especificamente apresenta-se uma técnica de projeto de constelações PSK (Phase Shift Keying) com símbolos não-equiprováveis otimizada via *Simulated Annealing* de forma a garantir boas características cicloestacionárias para um sensoriamento espectral eficiente..

O restante do artigo está organizado como segue: a Seção II apresenta os principais conceitos sobre o sensorimento por análise de cicloestacionariedades, a Seção III apresenta o método utilizado para a obtenção da constelação otimizada ao sensoriamento espectral, a Seção IV apresenta os resultados de simulações computacionais, e, por fim,na Seção V são apresentadas as conclusões do trabalho.

II. Processos Cicloestacionários

Um sinal $x(t)$ é dito cicloestacionário de segunda ordem (no sentido amplo) se houver uma transformação não-linear $f(\cdot)$ de segunda ordem tal que o sinal $y(t) = f(x(t))$ apresente componentes senoidais de amplitude finita [6]. De forma geral, os sinais com cicloestacionáriedade de segunda ordem apresentam a Função de Autocorrelação periódica no tempo t [12]:

$$R_x(t+T,\tau) = R_x(t,\tau), \tag{1}$$

em que T é o período de repetição e $R_x(t,\tau)$ é a função de Autocorrelação [6]:

$$R_x(t,\tau) = \left\langle x\left(t+\frac{\tau}{2}\right) x^*\left(t-\frac{\tau}{2}\right)\right\rangle, \tag{2}$$

em que símbolo $\langle\cdot\rangle$ representa o operador média temporal:

$$\langle\cdot\rangle = \lim_{T\to\infty}\frac{1}{T}\int_{-T/2}^{T/2}(\cdot)dt. \tag{3}$$

Quando a teoria de processos cicloestacionários de segunda ordem é aplicada ao sensoriamento espectral, três funções importantes são utilizadas: a Função Auto-Correlação Cíclica (*Ciclic Autocorrelation Function* - CAF), a Função de Densidade de Correlação Espectral (*Spectral Correlation Density Function* - SCD) e o Perfil Alfa [10].

A Função de Autocorrelação de um processo cicloestacionário de segunda ordem é periódica, logo pode ser representada através de uma série de Fourier [4]. Denomina-se de Função de Autocorrelação Cíclica (CAF) os coeficientes resultantes da expansão da função de Auto Correlação em uma série de Fourier [13], i.e.:

$$R_x^\alpha(\tau) = \left\langle x\left(t+\frac{\tau}{2}\right) x^*\left(t-\frac{\tau}{2}\right) e^{-j2\pi\alpha t}\right\rangle, \tag{4}$$

em que o parâmetro α é chamado frequência cíclica [5]. Dessa forma, um sinal $x(t)$ possui cicloestacionariedade de segunda ordem se sua CAF ($R_x^\alpha(\tau)$) apresentar valores não nulos para $\alpha \neq 0$ [4].

A Função de Densidade de Correlação Espectral, por sua vez, pode ser compreendida como a correlação estatística entre componentes espectrais $f+\alpha/2$ e $f-\alpha/2$ de um sinal $x(t)$ e pode ser determinada a partir do periodograma cíclico variante no tempo [4]:

$$S_x^\alpha(f) = \left\langle X\left(t, f+\frac{\alpha}{2}\right) X^*\left(t, f-\frac{\alpha}{2}\right)\right\rangle, \tag{5}$$

em que f é a frequência do sinal, expressa em Hz, e:

$$X(t,\nu) = \int_{t-T/2}^{t+T/2} x(u)e^{-j2\pi\nu u}du, \tag{6}$$

é uma STFT (*Short-Time Fourier Transform*) deslizante de tamanho T [2].

A avaliação da Função Densidade de Correlação Espectral, conforme expressa na Equação (5), gera como resultado uma superfície sobre o plano (f,α), simétrica tanto em f quanto em α [4]. Devido ao alto custo computacional em analisar um gráfico de superfície e considerando as simetrias presentes na SCD, em geral calcula-se uma projeção da SCD em um plano ortogonal a f, para valores de $\alpha > 0$, a qual denomina-se de Perfil Alfa [10], definida neste trabalho como:

$$\rho(\alpha) = \frac{\max_f\left[S_x^\alpha(f)\right]}{\max_{f,\alpha}\left[S_x^\alpha(f)\right]}. \tag{7}$$

A. Sensoriamento por análise de cicloestacionariedades

O método de sensoriamento por análise de características cicloestacionárias abordado neste trabalho é baseado na detecção de picos de amplitude no perfil alfa do sinal sensoriado. De forma geral, sabe-se que o ruído estacionário não possui qualquer correlação espectral para uma frequência cíclica diferente de zero ($\alpha \neq 0$) [4]. Neste caso utiliza-se uma abordagem baseada em uma métrica de sensoriamento, definida em R, e calculada a partir da função SCD, definida como [10]:

$$\varepsilon = \rho(\alpha = \alpha_i), \tag{8}$$

em que $\rho(\alpha = \alpha_i)$ é o perfil alfa do sinal sensoriado, calculado na frequência cíclica α_i. Dado que, em sinais modulados, as posições dos picos no perfil alfa são bem definidas [2], [4], [10], a frequência cíclica α_i é escolhida de forma a coincidir com os pontos do perfil alfa que apresentem esses picos.

Supondo a existência de um usuário primário, o valor da métrica de sensoriamento definida na Equação (12) calculada nos pontos onde ocorrem os picos no perfil alfa tenderão a ser maior do que zero ($\varepsilon(\alpha_i) > 0$). Contudo, se o usuário primário estiver ausente, o valor da métrica de sensoriamento aproxima-se de zero.

Desta forma, de posse dos resultados do cálculo do perfil alfa nos pontos característicos, basta calcular a métrica de sensoriamento nesses pontos e realizar uma detecção por limiar. Supondo-se o conhecimento do limiar sub-ótimo δ_t, a arquitetura de sensoriamento utilizada neste trabalho consiste em realizar um simples teste de hipótese binário para a detecção de usuários primários na faixa de espectro analisado:

- Se $\varepsilon(\alpha_i) > \delta_t$ então o usuário primário estará presente;
- Caso contrário, o usuário primário estará ausente ou seu sinal não utiliza uma modulação reconhecida pela estratégia proposta.

B. Sensoriamento em sinais com símbolos não equiprováveis

Em alguns sistemas de comunicações, os símbolos da constelação utilizada na modulação não são equiprováveis [14]. Pode-se observar que o uso de funções de análise de características cicloestacionárias em sinais que apresentem constelações com símbolos não-equiprováveis pode ser ineficiente em função de um "sombreamento" das características cicloestacionárias extraídas a partir desses sinais. [10].

As características cicloestacionárias de sinais não-equiprováveis como aqueles oriundos dos símbolos PSK relacionados na Tabela V, por exemplo, apresentam o perfil alfa ilustrado na Figura 1. Dado que o único pico existente é de baixa amplitude, em situações de baixa SNR, uma arquitetura de sensoriamento baseado nessa técnica de processamento pode gerar um falso-negativo.

TABELA I
CONSTELAÇÃO COM SÍMBOLOS NÃO EQUIPROVÁVEIS.

Símbolo	Ângulo de localização (rad)	Probabilidade
1	$\pi/8$	0.25
-1	$-\pi/8$	0.25
3	$3\pi/8$	0.125
-3	$-3\pi/8$	0.125
5	$5\pi/8$	0.0925
-5	$-5\pi/8$	0.0925
7	$7\pi/8$	0.0325
-7	$-7\pi/8$	0.0325

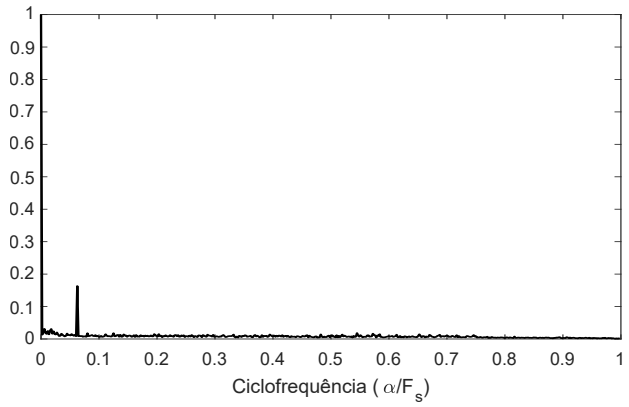

Fig. 1. Perfil Alfa para a Constelação Não-Equiprovável indicada na Tabela V.

Por sua vez, resultados obtidos por simulação computacional indicam que ao se ajustar os símbolos da constelação, as linhas espectrais resultantes da análise de características cicloestacionárias são evidenciadas [10].

Na seção a seguir detalha-se um método de ajuste de ângulos de uma constelação PSK com símbolos não equiprováveis otimizada para o sensoriamento espectral, baseado no algoritmo do *Simulated Annealing*.

III. PROJETO DE CONSTELAÇÕES NÃO EQUIPROVÁVEIS PARA O SENSORIAMENTO ESPECTRAL

A busca por constelações otimizadas ao sensoriamento espectral ocorreu por meio do algoritmo *Simulated Annealing*. Dado a complexidade do problema, associado ao fato que a função objetivo apresenta vários mínimos locais, o algoritmo do *Simulated Annealing* foi utilizado em função dos seguintes fatores: (i) sua simplicidade de implementação; (ii) sua versatilidade em resolver problemas predominantemente estocásticos e (iii) a robustez desse algoritmo em determinar o ótimo global em cenários caracterizados pela presença de múltiplos mínimos locais no espaço de busca da função [15], [16].

Neste trabalho a função objetivo é determinada visando maximizar a taxa de detecção do sinal, definida em função da amplitude dos picos presentes no perfil alfa que caracterizam esses sinais no espectro de frequências cíclicas..

Assim, considerando que constelações M-PSK possuem perfil alfa com uma única linha espectral na frequência cíclica $\alpha = \alpha_i$, pode-se definir a função objetivo ($F(\mathbf{x})$) a ser maximizada pelo *Simulated Annealing* como:

$$F(\mathbf{x}) = \rho(\alpha = \alpha_i, \mathbf{x}), \tag{9}$$

em que o vetor $\mathbf{x}$ representa os ângulos da constelação projetada e $\rho(\alpha = \alpha_i, \mathbf{x})$ é o valor do perfil alfa da constelação x calculado na frequência cíclica α_i.

A obtenção do valor $\rho(\alpha = f_s/16, \mathbf{x})$ pode ser realizada por qualquer algoritmo de cálculo da SCD.. Neste trabalho, a estimação desta função foi realizada por meio do algoritmo CPD (*Cyclic Periodogram Detection*), descrito em [17].

O vetor de ângulos da constelação $\mathbf{x}$ foi inciado de forma equiespaçada em uma circunferência de raio unitário, conforme apresentado na Tabela I. A busca pela constelação ocorre apenas no semi-círculo superior da constelação. Essa restrição reduz o espaço de busca e garante que a média da constelação sempre será nula.

A modificação aleatória do estado no algoritmo se deu somando-se um valor aleatório pequeno, seguindo uma distribuição uniforme $U(-\pi/50, \pi/50)$, em uma posição escolhida ao acaso do vetor $\mathbf{x}$ de ângulos da constelação.

IV. RESULTADOS DE SIMULAÇÕES

Nesta seção são apresentados alguns resultados de simulação referentes ao projeto de constelações não-equiprováveis adequadas ao sensoriamento espectral por características cicloestacionárias. Neste trabalho utilizou-se uma constelação 8-PSK, com energia unitária e distribuição de probabilidade dos símbolos apresentada na Tabela I.

O modelo do canal de comunicações considerado nas simulações é caracterizado pelo ruído aditivo Gaussiano branco (AWGN). Neste caso o vetor de sinal recebido $\mathbf{y}$ pode ser escrito em função do vetor do sinal transmitido $\mathbf{x}$ como [18]:

$$\mathbf{y} = \mathbf{x} + \mathbf{n} \tag{10}$$

em que $\mathbf{n}$ é o vetor de ruído branco Gaussiano aditivo de média nula e variância $N_0/2$ por dimensão, em que N_0 é calculado por [18]:

$$N_0 = 10^{-0.1E_b/N_{0(SNR)}} \tag{11}$$

O *Simulated Annealing* utilizado na otimização da constelação foi ajustado com os parâmetros de simulação sub-ótimos apresentados na Tabela II.

TABELA II

PARÂMETROS UTILIZADOS NO SIMULATED ANNEALING

Parâmetro	Valor
Temperatura Inicial	200
Resfriamento	Geométrico
Fator de Resfriamento	0.98
Iterações por Temperatura	10
Quantidade de Iterações	3500

Para a obtenção do perfil alfa, necessário para o cálculo da função-objetivo, foi simulado um sinal em banda passante definido pela constelação a ser otimizada. O sinal foi modulado com os parâmetros descritos na Tabela III e formatados com um pulso do tipo cosseno elevado. A estimação do perfil alfa foi realizada por meio do algoritmo CPD (*Cyclic Periodogram Detection*), descrito em [17], com os parâmetros descritos na Tabela IV.

TABELA III

PARÂMETROS DO SINAL SIMULADO PARA A ESTIMAÇÃO DO PERFIL ALFA PARA A OBTENÇÃO DA FUNÇÃO-OBJETIVO

Característica	Parametrização
Frequência da Portadora	$f_c = 1024Hz$
Frequência de amostragem	$f_s = 4096Hz$
Quantidade de amostras do sinal em banda base	4096 amostras
Número de amostras por símbolo	16 amostras/símbolo
Fator de *roll-off*	0.5

TABELA IV

PARÂMETROS DO ALGORITMO CPD UTILIZADO NA ESTIMAÇÃO DO PERFIL ALFA PARA A OBTENÇÃO DA FUNÇÃO-OBJETIVO

Característica	Parametrização
Resolução no eixo α	$\Delta\alpha = 8$Hz
Resolução no eixo f	$\Delta f = 16$Hz

A Tabela V apresenta os ângulos da constelação PSK obtida na otimização por *Simulated Annealing*. Observa-se que os pontos da constelação não estão equi-espaçados na circunferência de raio unitário.

TABELA V

CONSTELAÇÃO OTIMIZADA AO SENSORIAMENTO ESPECTRAL

Símbolo	Ângulo de localização (rad)	Probabilidade
1	1.6337	0.25
-1	-1.6337	0.25
3	0.7994	0.125
-3	-0.7994	0.125
5	2.2911	0.0925
-5	-2.2911	0.0925
7	2.8824	0.0325
-7	-2.8824	0.0325

O perfil alfa obtido para os sinais oriundos da constelação descrita na Tabela V está ilustrado na Figura 2. Observa-se que, quando este é comparado ao perfil alfa da Figura 1 (correspondente à da constelação não-otimizada) com o Perfil Alfa da Figura 2 (correspondente à constelação otimizada) a amplitude das raias espectrais são mais elevadas, o que indica uma taxa de detecção maior no sensoriamento dos sinais PSK otimizados.

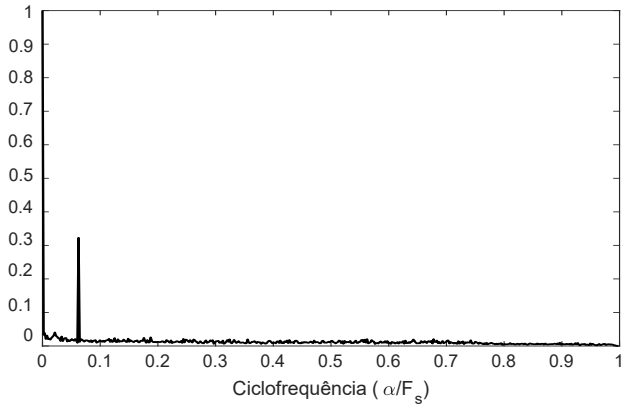

Fig. 2. Perfil Alfa para a Constelação Otimizada para o Sensoriamento Espectral.

Analisando a Figura 2, nota-se que o perfil alfa desta constelação apresenta uma linha espectral localizada em $\alpha = f_s/16$, e desta forma pode-se utilizar este ponto do cicloespectro para o sensoriamento espectral. Desta maneira, a métrica de sensoriamento utilizada neste trabalho consiste em:

$$\varepsilon = \rho\,(\alpha = f_s/16). \tag{12}$$

Tomando-se como base o padrão internacional IEEE 802.22, que regulamenta alguns requisitos dos sistemas de rádio cognitivo, deseja-se uma probabilidade de falso alarme constante de 10% [1]. Essa probabilidade de falso alarme pode ser obtida regulando-se o limiar de decisão a ser utilizado na arquitetura de sensoriamento espectral.

Dado que não foi possível encontrar uma relação matemática entre a probabilidade de falso alarme e um dado limiar de sensoriamento, neste trabalho obteve-se por simulação uma curva que relaciona esses dois parâmetros, ilustrada na Figura 3. Para cada valor de limiar foram feitos 500 testes e calculou-se a probabilidade de falso alarme para cada um dos valores de limiar de detecção.

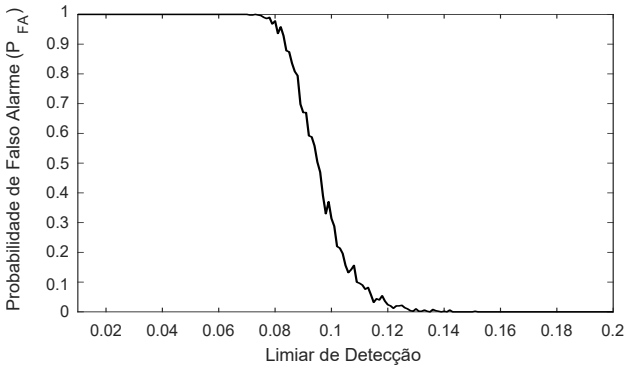

Fig. 3. Probabilidade de Falso Alarme em Função do Limiar de Detecção.

A partir da observação da Figura 3, estipulou-se um limiar de decisão δ=0,109, que leva a uma probabilidade de falso alarme aproximadamente igual a 10%. O desempenho da arquitetura de sensoriamento proposta foi avaliado considerando-se esse limiar.

A Figura 4 apresenta a taxa de detecção dos sinais associados à constelação otimizada. Cada ponto da curva foi obtido como uma média das decisões tomadas em 3500 testes. Observa-se que o sensoriamento dos sinais PSK oriundos da constelação otimizada apresenta resultados satifatórios até a ordem de -16dB. Além disso, observa-se também que a taxa de detecção para a constelação projetada é superior quando comparada a da constelação original. Nota-se que os resultados para a taxa de detecção da constelação obtida neste trabalho diferem em aproximadamente +4dB da constelação original, demonstrando o seu melhor desempenho na detecção do usuário primário.

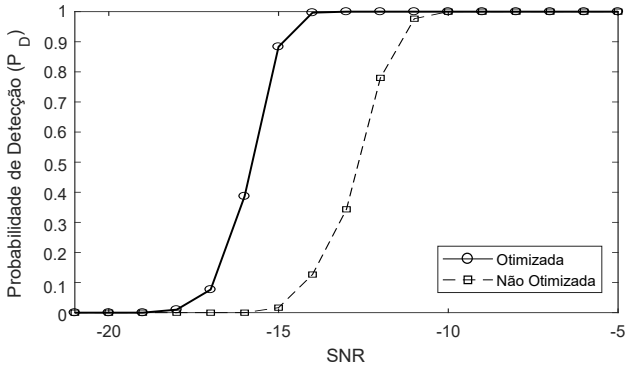

Fig. 4. Probabilidade de Detecção do Usuário Primário em Função da SNR.

V. Conclusões

Neste trabalho apresenta-se um método para a obtenção de constelações adequadas ao sensoriamento de sinais com símbolos não-equiprováveis por análise de características cicloestacionárias,, bem como os resultados de simulações referentes a análise de desempenho das constelações projetadas. A partir dos resultados de simulações obtidos, pôde-se constatar que o método de projeto utilizando o *Simulated Anneling* foi eficiente no projeto destas constelações.

Dois pontos importantes podem ser analisados para o método de sensoriamento adotado. O primeiro é que a implementação do método de sensoriamento por características cicloestacionárias descrito neste trabalho depende do conhecimento da frequência de amostragem e da taxa de sobreamostragem do sinal a ser sensoriado. Um erro na estimação desses parâmetros irá acarretar em erros no sensoriamento. O segundo é que resultados melhores poderiam ter sido alcançados aumentando-se o número de amostras analisadas, porém isso implicaria em uma carga computacional igualmente superior, principalmente no cálculo das medidas cicloestacionárias.

Em trabalhos futuros pretende-se investigar o efeito de algumas variáveis que não foram modeladas no desempenho do sensoriamento espectral, como: desvanecimento, detecção em ambientes com espalhamento de espectro, detecção em canais caracterizados pela seletividade em frequência e desvanecimento por sombreamento. Além disso, pretende-se realizar uma otimização multiobjetivo, reforçando os compromissos entre probabilidade de detecção do usuário primário e a probabilidade de erro de demodulação do sistema. Por fim, pretende-se realizar o estudo do comportamento do método de sensoriamento analisado e da constelação projetada em cenários caracterizados por ruído não-Gaussiano.

Referências

[1] P.S. Coutinho - *Detecção de Energia para Rádios Cognitivos usando GNU Radio e USRP2* - Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2011.

[2] P.T.V. Souza e L.F.Q. Silveira - *Detecção de Sinais Modulados usando Medida de Cicloestacionariedade* - 31º Simpósio Brasileiro de Telecomunicações - SBrT 2013.

[3] R.W. Brodersen - *A cognitive radio approach for usage of virtual unlicensed spectrum.* [S.l.], Julho 2004.

[4] W.A. Gardner - *Cyclostationarity in Communications and Signal Processing* - IEEE Press, 1994.

[5] A. Farias, C.E.N. Melo e R.V Dias - *Uma Abordagem a Métodos de Sensoriamento do Espectro Aplicados a Rádio Cognitivo* - UNB, Brasilia, 2010.

[6] E.L. Costa - *Detectional and Identification of Cyclostationary Signals - Naval Postghraduate School*, 1996.

[7] K. Kim (et al) - *Cyclostationary Approaches to Signal Detection and Classification in Cognitive Radio, 2nd IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks* (DySPAN-07), pp.212-215, Apr. 2007.

[8] S. Kandeepan, G. Baldini e R. Piesiewicz - *Experimentally detecting ieee 802.11n wi-fi based on cyclostationarity features for ultra-wide band cognitive radios* in IEEE 20th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, pp. 2315-2319, 2009.

[9] S.R.Q. Thai e G.M.M. Kandeepan - *Energy-Efficient Spectrum Sensing Using Cyclostationarity* - IEEE, 2011.

[10] P.T.V. Souza - *Análise da Codificação Wavelet em Sistemas de Rádio com Acesso Dinâmico ao Espectro* - Dissertação de Mestrado. UFRN, 2017.

[11] H. Arslan - *Cognitive Radio, Software Defined Radio, and Adaptive Wireless Systems*. Signals and Communication Technology. Springer Netherlands, 2007.

[12] S. Haykin e M. Moher - *Sistemas de Comunicação* - 5º Edição, Bookman, 2011.

[13] W.A. Gardner - *Statistical Spectral Analysis: A Nonprobabilistic Theory*. New Jersey: Prentice-Hall, 1988.

[14] L.F.Q. Silveira - *Análise da Codificação Wavelet em Sistemas sujeitos ao Desvaneicimento Plano Rayleigh*. Tese de Doutorado, UFCG, 2006.

[15] P. Norving, S. J. Russell - *Inteligência Artificial* - 3º Edição, Elsevier, 2013.

[16] B. Coppin - *Inteligência Artificial*. LTC, 2015.

[17] Z. Zhang e X. Xur - *Implementation of cyclic periodogram detection on VEE for cognitives* - [S.l.], 2007.

[18] J. Proakis - *Digital Communications*, Mc-Graw Hill, New York, 1989.