

Análise de Oscilações de Baixa Frequência em Sinais de Sistemas Elétricos de Potência utilizando VMD e Prony

Gabriel Marcos Silva, Afonso Henrique Souza de Almeida, Leandro Rodrigues Manso Silva e Carlos Augusto Duque.

Resumo— Este artigo aborda a análise de oscilações de baixa frequência em sistemas elétricos de potência utilizando os algoritmos de VMD (*Variational Mode decomposition*) e Prony. As oscilações de baixa frequência podem causar instabilidade ao sistema elétrico e comprometer sua operação e confiabilidade. O algoritmo de VMD é usado para decompor o sinal elétrico em seus componentes modais e atenuar o ruído. O algoritmo de Prony é usado para modelar os componentes modais resultantes e determinar os parâmetros do modelo. Os resultados obtidos mostram que a combinação desses dois algoritmos permite uma análise eficiente e precisa para detectar e analisar oscilações de baixa frequência em sistemas elétricos de potência.

Palavras-Chave— Oscilações de baixa frequência, sistemas elétricos de potência, análise de sinais, VMD, Prony, instabilidade do sistema elétrico.

Abstract— This article addresses the analysis of low-frequency oscillations in power systems using VMD (*Variational Mode Decomposition*) and Prony algorithms. Low-frequency oscillations can cause instability in the power system and compromise its operation and reliability. The VMD algorithm is used to decompose the electrical signal into its modal components and attenuate noise. The Prony algorithm is used to model the resulting modal components and determine the parameters of the model. The results obtained shows that the combination of these two algorithms allows for efficient and accurate analysis to detect and analyze low-frequency oscillations in power systems.

Keywords— Low Frequency Oscillations, Electrical Power Systems, Variational Mode Decomposition, Prony.

I. INTRODUÇÃO

As oscilações de baixa frequência (do inglês, *Low Frequency Oscillation* - LFO) em sistemas elétricos de potência são um fenômeno que pode afetar a estabilidade e confiabilidade do sistema. Essas oscilações podem ocorrer devido a diversas causas, como alterações na carga, falhas em equipamentos, perturbações externas, entre outros. Quando não tratadas, as oscilações podem levar a perda de sincronismo entre geradores, resultando, em última instância, em interrupção no fornecimento de energia elétrica. Por isso, a análise e detecção precoce dessas oscilações é fundamental para garantir a estabilidade e bom funcionamento do sistema elétrico de potência.

A causa raiz das LFO é um desequilíbrio entre a demanda e a energia disponível em um determinado momento. O fenômeno envolve a oscilação mecânica do ângulo de fase

do rotor em relação a uma estrutura rotativa. As oscilações de baixa frequência podem ser classificadas como modo local e interárea. Os modos de oscilação local estão relacionados à oscilação da unidade geradora em relação ao restante do sistema, normalmente ocorrem na faixa de 1 a 2 Hz. Os modos interárea são relativos às oscilações de um conjunto de máquinas em uma porção do sistema em relação às máquinas das outras partes, normalmente ocorrem na faixa de 0,1 a 1 Hz [1].

A identificação dos componentes LFO é uma tarefa crucial para se melhorar a estabilidade em Sistemas Elétricos de Potência, sob condições de carga e/ou geração variável. O grande desafio é encontrar os modos de oscilação verdadeiros, porém, como se trata de uma tarefa complicada, do ponto de vista de processamento de sinais, componentes fictícios podem ser identificados na análise, deteriorando o desempenho dos algoritmos de controle e operação do sistema, podendo inclusive, levar o sistema ao colapso [2].

Nos últimos anos, diversos algoritmos vêm sendo aplicados nos estudos das LFO com o objetivo de se encontrar modelos cada vez mais eficazes e que sejam capazes de estimar os parâmetros dos modos de oscilação verdadeiramente presentes no sinal. Devido ao grande desafio imposto pelo problema, a combinação de duas ou mais técnicas de processamento de sinais, com características complementares, vem sendo amplamente empregada de forma a aprofundar a análise dos sinais e proporcionar um melhor desempenho. Considerando que todas as técnicas possuem vantagens e desvantagens, as limitações encontradas em uma técnica buscam ser sanadas a partir da aplicação de outra técnica. Por exemplo, uma abordagem comum é aplicar uma técnica de filtragem para remover ruído e, em seguida, utilizar um algoritmo para realizar a estimação dos parâmetros.

Em [3] os autores combinam os algoritmos *Variational Mode Decomposition* (VMD) e o método de subespaço estocástico (do inglês, *Stochastic Subspace Method* - SSI). O VMD é utilizado visando extrair os modos de frequência e reduzir o ruído presente no sinal elétrico original, enquanto o algoritmo do subespaço estocástico é aplicado com o objetivo de realizar a identificação dos parâmetros modais das LFO. Já no artigo [4] os autores utilizam-se da transformada de Hilbert–Huang (do inglês, *Hilbert–Huang Transform* - HHT) para análise de LFO em sinais elétricos. A técnica consiste na combinação do algoritmo de decomposição em modo empírico (do inglês, *Empirical Mode Decomposition* - EMD) para

decompor o sinal original em sinais elementares conhecidos como funções de modo intrínseco (do inglês, *Intrinsic Mode Functions* - IMF) e posteriormente realizar uma análise espectral de Hilbert para computar dados instantâneos de frequência e amplitude de cada IMF em função do tempo.

A combinação das técnicas *Exact Model Order* (EMO) e *Estimation of Signal Parameters via Rotational Invariance Technique* (ESPRIT) é utilizada em [5], onde a EMO é responsável por estimar a correta ordem do modelo que é utilizada como parâmetro de entrada pelo ESPRIT. No trabalho foram utilizados sinais sintéticos e reais para a validação do método, considerando diferentes níveis de ruído.

Em [6] é utilizada uma combinação das técnicas *Singular Value Decomposition* (SVD) e Prony, onde o problema de estimação da ordem do modelo do Prony é solucionado pela decomposição feita pelo SVD. Para eliminar o efeito do ruído, outro procedimento baseado em pontos interiores é utilizado. O método foi testado com sinais reais do sistema elétrico da China.

Dentro deste contexto, o presente trabalho propõe a utilização das técnicas VMD e Prony, para realizar a estimação dos parâmetros de componentes de LFO, presentes em sinais de sistemas elétricos de potência. A ideia da utilização de VMD é isolar cada componente do sinal e atenuar o ruído. Desta forma o Prony pode ser utilizado com ordem do modelo igual à 1 e encontra um cenário mais favorável para a estimação dos parâmetros.

O trabalho está dividido como segue: na Seção II será apresentada uma revisão teórica sobre as técnicas VMD e Prony, a Seção III apresentará o método proposto, na Seção IV serão mostrados os resultados e discussões, e por fim, a Seção V apresentará as conclusões do trabalho.

II. REVISÃO TEÓRICA

A. VMD - Variational Mode Decomposition

O algoritmo VMD [7] é uma técnica de decomposição de sinais em componentes modais, desenvolvida por Dragomirskiy e Zosso, que se baseia na ideia do algoritmo EMD (*Empirical mode decomposition*) proposta por Huang [8], ainda nos anos 90.

O VMD é utilizado para decompor um sinal em diferentes modos de oscilação ou *Intrinsic Mode Functions* (IMF), cada um com uma frequência central e uma banda de frequência associada. Cada IMF é definida como:

$$IMF_k(t) = A_k(t) \cos(\phi_k(t)) \quad (1)$$

em que $\phi_k(t)$ é a fase total do sinal e $A_k(t)$ é sua envoltória. Há uma restrição de que tanto a frequência instantânea, quanto o envelope variem mais lentamente do que a fase.

O algoritmo é baseado em uma iteração alternada de filtragem e projeção, e é capaz de lidar com sinais não-estacionários. A principal vantagem do VMD é sua capacidade de decompor sinais complexos em modos mais precisos e estáveis do que outros métodos, como a Transformada de Fourier ou a Transformada Wavelet. Além disso, o VMD possui um parâmetro de balanço α que controla a esparsidade dos modos durante a decomposição, permitindo uma separação

mais limpa, mais esparsa e mais bem definida dos modos em comparação com o EMD. Isso evita o problema de modos misturados encontrado no EMD, onde as funções de modo intrínseco podem se misturar e levar a resultados menos precisos. Ao obter modos esparsos, é possível extrair os principais componentes ou padrões do sinal, eliminando componentes redundantes ou de baixa contribuição. A esparsidade é útil quando os sinais possuem componentes dominantes em frequências específicas, permitindo uma decomposição mais focada nessas frequências relevantes. O VMD é amplamente utilizado em aplicações de análise de sinais, incluindo processamento de sinais biológicos, de áudio e de imagens.

Cada IMF é caracterizada por uma frequência central e uma banda de frequência associada, que representam as oscilações presentes nessa parte específica do sinal. Após a decomposição, esses componentes são, geralmente, ordenados em ordem decrescente de suas energias, ou seja, a primeira IMF é aquela com maior energia, seguida pela segunda, terceira e assim por diante. As IMF podem ser interpretadas como diferentes padrões ou modos de oscilação presentes no sinal original, e sua análise pode ser útil para identificar diferentes processos físicos ou fenômenos que afetam o sinal, como por exemplo a presença das LFO no sinal elétrico em estudo.

B. Método de Prony

O método de Prony é uma técnica de análise de sinais que permite estimar os parâmetros de uma função exponencial complexa a partir de um sinal discretizado. O método de Prony foi desenvolvido originalmente em 1795, por Gaspard Riche, Barão de Prony, que acreditava que as leis que governam a expansão de gases poderiam ser modeladas por meio de uma soma de exponenciais amortecidas [9].

O método de Prony basicamente realiza a decomposição de um sinal em uma soma de exponenciais complexas amortecidas, cada uma representando uma frequência específica do sinal. Em seguida, a partir da análise dessas exponenciais, é possível estimar os parâmetros como amplitude, fator de amortecimento, frequência e fase de cada componente. Esses parâmetros podem ser utilizados para análise de espectro, modelagem de sinais e previsão de séries temporais. Neste trabalho, utiliza-se a estimação dos parâmetros para modelar o componente de baixa frequência presente no sinal elétrico original. No entanto, a eficácia do método está diretamente relacionada com a qualidade do sinal original, sendo a presença de ruído um fator determinante para o insucesso da estimação dos parâmetros através do Prony. Nesses casos, é necessário realizar um pré-processamento com técnicas complementares ao sinal original.

A implementação do Prony realizada neste trabalho é baseada no método polinomial [10] e é descrita abaixo:

Um sinal discreto $x[n]$, onde $n = 1, \dots, N..$ pode ser representado como uma soma de funções exponenciais complexas de ordem p conforme a expressão:

$$x[n] = \sum_{k=1}^p A_k e^{j\theta_k} e^{(\alpha_k + j2\pi f_k)T_s(n-1)} = \sum_{k=1}^p h_k \cdot z_k^{(n-1)} \quad (2)$$

em que, A_k é a amplitude inicial, α_k é o fator de amortecimento, f_k é a frequência em Hertz, T_s é o período de amostragem em segundos, θ_k é a fase inicial em radianos do k -ésimo componente do sinal. O termo h_k é a amplitude da componente exponencial e z_k são os polos (raízes) da transformada Z do sinal discreto associados à k -ésima componente. $n - 1$ é o instante anterior.

O primeiro passo da implementação do método é a resolução do seguinte problema de mínimos quadrados:

$\mathbf{T}_{(N-L) \times L} \cdot \mathbf{a}_{L \times 1} = \mathbf{x}_{L \times 1}$. Onde \mathbf{T} é a matriz Toeplitz do sinal de entrada, \mathbf{x} é o vetor que contém o sinal de entrada, N é o comprimento do sinal de entrada, $L = 2p$ e p é a ordem do modelo.

O resultado do sistema é um vetor \mathbf{a} com dimensão $L \times 1$, que contém os coeficientes de um polinômio de ordem $L - 1$ que melhor se ajusta aos dados de entrada. Esses coeficientes são usados para encontrar os parâmetros do modelo de Prony.

Na sequência, deve-se encontrar as raízes do polinômio de Prony formado a partir dos coeficientes do vetor \mathbf{a} no passo anterior. As raízes serão os coeficientes z_k da equação (2). A partir de z_k calcula-se o fator de amortecimento e a frequência da seguinte forma:

$$\alpha_k = \frac{\ln |z_k|}{T_s} \quad (3)$$

$$f_k = \frac{\tan^{-1} \left(\frac{\text{Im}(z_k)}{\text{Re}(z_k)} \right)}{2\pi T_s} \quad (4)$$

Por fim, deve-se resolver seguinte sistema:

$$\begin{pmatrix} z_1^0 & z_2^0 & \cdots & z_L^0 \\ z_1^1 & z_2^1 & \cdots & z_L^1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ z_1^{N-1} & z_2^{N-1} & \cdots & z_L^{N-1} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} h_1 \\ h_2 \\ \vdots \\ h_L \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x[1] \\ x[2] \\ \vdots \\ x[N-1] \end{pmatrix} \quad (5)$$

onde $\mathbf{Z}_{N \times L}$ é a matriz formada pelas potências dos valores complexos z_k correspondentes aos polos do sistema e \mathbf{x} o sinal de entrada original que se deseja analisar.

Os parâmetros de amplitude e fase são então obtidos, a partir de \mathbf{h} , da seguinte forma:

$$A_k = |h_k| \quad (6)$$

$$\theta_k = \tan^{-1} \left(\frac{\text{Im}(h_k)}{\text{Re}(h_k)} \right) \quad (7)$$

III. MÉTODO PROPOSTO

O método proposto se baseia na implementação conjunta dos métodos VMD e Prony buscando-se uma análise mais refinada dos sinais em estudo. A ideia principal é que ao decompor o sinal, a quantidade de ruído presente em cada componente seja significativamente menor do que a quantidade de ruído presente em todo o sinal, proporcionando assim que o Prony apresente bons resultados, já que a deficiência do Prony em cenários ruidosos é amplamente conhecida. Uma vez que o Prony é utilizado para analisar cada IMF separada,

ou seja, um sinal de apenas uma frequência dominante, sua ordem será sempre $p = 1$. Um diagrama geral do método proposto é mostrado na Figura 1.

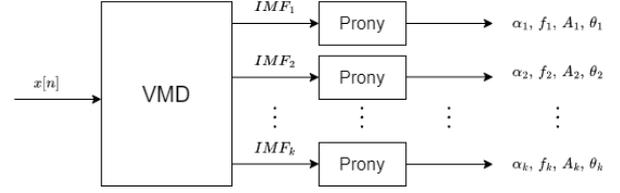


Fig. 1. Diagrama de blocos do método proposto.

O VMD é responsável por decompor o sinal em seus componentes de frequência e com isso filtrar o ruído presente no sinal de entrada. O grande desafio é ajustar os parâmetros de entrada, para ajustar o número de modos e para controlar a precisão e eficiência do algoritmo. Neste trabalho, o algoritmo VMD foi implementado em Python com o auxílio da biblioteca *vmdpy*, originalmente implementada em [11]. A função do VMD possui os seguintes parâmetros de entrada:

- α : é o parâmetro que controla o equilíbrio da restrição de fidelidade dos dados. No algoritmo VMD, a decomposição do sinal é realizada de forma variacional, utilizando uma função objetivo que envolve a fidelidade aos dados e a esparsidade dos componentes modais, ou seja, sua dispersão. O parâmetro α controla o equilíbrio entre essas duas contribuições.
- τ : é o parâmetro que controla a largura da banda. Valores maiores de τ permitem extrair componentes mais largas em frequência. Quando $\tau = 0$, todas as frequências são consideradas.
- K : é o número de modos que serão extraídos pelo VMD. Esse parâmetro define a quantidade de componentes do sinal que serão extraídos.
- DC : é uma flag booleana que indica se o modo com frequência zero (ou a média do sinal) será extraído ($DC = 1$) ou não ($DC = 0$).
- $init$: é o modo de inicialização do VMD. Pode ser:
 - 0 \rightarrow todas as frequências iniciais começam em 0.
 - 1 \rightarrow todas as frequências iniciais começam uniformemente distribuídas
 - 2 \rightarrow todas as frequências iniciais são inicializadas aleatoriamente
- tol : é a tolerância para a convergência do método de otimização usado para encontrar os modos. Valores menores de tol garantem uma maior precisão na solução, mas aumentam o tempo de processamento.

O ajuste dos parâmetros de entrada do algoritmo VMD foi feito de forma empírica, buscando minimizar os erros na identificação dos modos de oscilação. Os parâmetros usados para os testes que serão detalhados mais adiante se encontram na tabela abaixo.

Os parâmetros de entrada do algoritmo do VMD foram testados de forma a minimizar o erro do sinal reconstruído ao final do método de Prony. Como no caso desse trabalho já conhece-se de antemão os componentes do sinal original e

TABELA I
PARÂMETROS DE ENTRADA DO ALGORITMO VMD

Parâmetro	Valor
α	10^6
τ	0
K	2
DC	0
$init$	0
tol	10^{-15}

suas características (por exemplo a presença de 2 frequências dominantes no sinal, um componente de 60 Hz e um componente de baixa frequência contido no intervalo de 0,1 a 2 Hz) bastou-se variar os parâmetros até chegar em uma combinação que o ruído seria minimizado mesmo que isso custasse um aumento considerável no tempo de processamento.

De posse dos componentes de frequência previamente filtrados pelo VMD, o Prony pode ser aplicado, como descrito na seção anterior, a cada componente individualmente (considerando um modelo de ordem $p = 1$) para estimar os parâmetros que caracterizam cada componente de frequência.

IV. RESULTADOS

O método proposto é capaz de processar, ou seja, extrair e estimar os parâmetros de cada componente de um sinal com diversos componentes modais de frequência. Porém, como o presente trabalho é focado na estimação dos parâmetros dos componentes de baixa frequência, os sinais utilizados para a realização dos testes foram gerados de acordo com a seguinte equação:

$$x[n] = \cos[2\pi f_1 n T_s] + A_i e^{\sigma_i n T_s} \cos[2\pi f_i n T_s + \phi_i] + \nu[n] \quad (8)$$

em que, $f_1 = 60$ Hz é a frequência fundamental, cujo componente possui amplitude constante igual a 1. A frequência f_i assume diferentes valores na faixa de 0,1 Hz a 2 Hz de forma a caracterizar um componente de oscilação de baixa frequência. Este componente é amortecido, de acordo com fator de decaimento σ_i , possui amplitude inicial A_i e fase inicial ϕ_i . Um componente de ruído $\nu[n]$ é somado ao sinal.

Os sinais foram gerados utilizando uma frequência de amostragem $F_s = 10$ kHz e um total de 10 s de duração, ou seja, conterão 100000 amostras. Como a decomposição realizada pelo VMD apresenta transitórios no início e no final da janela de sinal analisada, devido ao seu processo de filtragem adaptativa, antes da aplicação do Prony é necessário descartar algumas amostras no início e no final de cada componente filtrado. Desta forma, foram descartadas 5% do total de amostras no início do sinal e 5% no final.

Após o descarte do transitório, o componente de baixa frequência (LFO) resultante do VMD, alvo da análise, é aplicado ao Prony com ordem do modelo $p = 1$ para estimar os parâmetros do sinal. Os parâmetros gerados são então comparados individualmente com os parâmetros utilizados para gerar cada sinal. A qualidade da estimação é avaliada através do cálculo do erro relativo entre o parâmetro estimado e o parâmetro utilizado para gerar o sinal.

Para ilustrar a aplicação do método proposto é mostrado na Figura 2 o resultado visual sobre a extração do componente de baixa frequência, realizada pelo VMD, sobre sua reconstrução utilizando os parâmetros estimados pelo Prony. Os parâmetros utilizados para gerar o sinal estão mostrados na tabela abaixo.

TABELA II
PARÂMETROS GERADOS PARA TESTE

Parâmetro	Valor
f_i	0,83
A_i	0,11
ϕ_i	1,08
σ_i	-0,32

A Figura 2 mostra o componente de baixa frequência do sinal de entrada em amarelo, o componente decomposto via algoritmo do VMD em preto tracejado e a LFO reconstruída a partir dos parâmetros estimados pelo método de Prony em vermelho tracejado, para diferentes valores de Relação Sinal Ruído (do inglês, *Signal to Noise Ratio* - SNR).

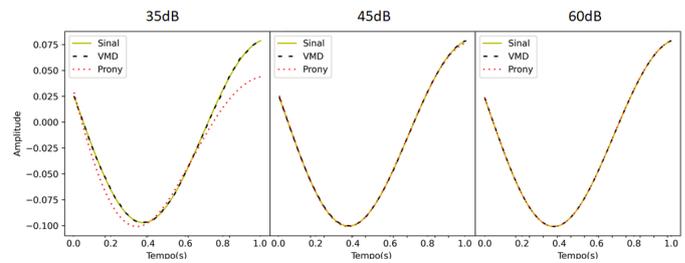


Fig. 2. Componente de baixa frequência reconstruída com ruído em 35 dB, 45 dB e 60 dB respectivamente. A figura apresenta apenas o primeiro segundo do sinal. (Elaborado pelo autor)

Inspecionando a Figura 2, é possível notar que o VMD foi capaz de extrair corretamente o componente de baixa frequência para os três valores de SNR utilizados. Já o algoritmo do Prony funcionou corretamente apenas para SNR de 60 dB e 45 dB, o que para sinais de sistemas elétricos de potência é suficiente, visto que os valores de SNR encontrados na literatura não são menores do que 45 dB. A dificuldade do Prony em lidar com o ruído é bastante conhecida na literatura e o que justifica o seu mau desempenho com 35 dB de ruído é o fato de que o VMD é capaz de atenuar o ruído presente no sinal, mas não eliminá-lo.

Para exemplificar a dificuldade do Prony de trabalhar com sinais que contenham presença de ruído, executou-se um teste que consistiu em aplicar um componente de baixa frequência, gerado com os mesmo parâmetros da tabela II diretamente no algoritmo de Prony sem antes realizar a filtragem dos ruídos do sinal com a aplicação do VMD. Para os mesmos valores de SNR mostrados na Figura 2 o Prony não foi capaz de estimar os parâmetros. Apenas para sinais com SNR superiores a 120 dB. Os resultados estão mostrados na Figura 3.

Observando a Figura 3 é possível notar que apenas para SNR=140 dB o Prony proporcionou uma boa reconstrução da LFO, atestando assim, a eficácia do VMD em atenuar o ruído do sinal.

Para validar o desempenho do método proposto, um total de 3000 testes foram gerados, sendo 1000 para SNR = 35 dB,

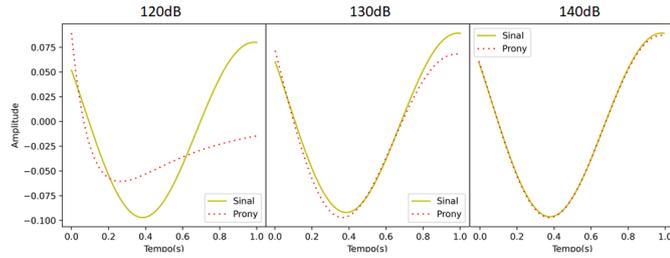


Fig. 3. Componente de baixa frequência reconstruída com ruído em 120 dB, 130 dB e 140 dB respectivamente, utilizando apenas o método de Prony. A figura apresenta apenas o primeiro segundo do sinal. (Elaborado pelo autor)

1000 para $SNR = 45$ dB e 1000 para $SNR = 60$ dB, utilizando os parâmetros de amplitude, frequência, fase e fator de decaimento sendo gerados de forma aleatória de acordo com os limites mostrados na tabela abaixo:

TABELA III
INTERVALO DOS PARÂMETROS GERADOS

Parâmetro	Faixa de valores
f_i	0,1 a 2 Hz
A_i	0,1 a 0,5
ϕ_i	$-\pi$ a π
σ_i	0 a -0,5

Os resultados para o Erro Médio Relativo (EMR) e desvio padrão (δ) do EMR estão mostrados na Tabela IV. Nota-se que o erro individual de cada parâmetro bem como o erro geral do sinal reconstruído diminui a medida que o teste é realizado com menores níveis de ruído. Isso se deve pois quanto maior o ruído, menor é a capacidade do VMD em eliminá-lo completamente do modo de baixa frequência estimado e o método de Prony, por sua vez, apresenta maior dificuldade para estimar os parâmetros de sinais contendo ruído.

TABELA IV
ERRO MÉDIO E DESVIO PADRÃO PARA OS 3 NÍVEIS DE RUÍDO

SNR	35 dB	45 dB	60 dB
EMR_f (%)	0,941071	0,114818	0,049253
δ_f (%)	7,222416	0,365997	0,046024
EMR_A (%)	5,409642	0,665316	0,301922
δ_A (%)	28,15436	1,199693	0,255479
EMR_ϕ (%)	1,999014	1,474199	1,56571
δ_ϕ (%)	13,281967	11,57318	34,300851
EMR_σ (%)	16,027723	2,842797	0,977033
δ_σ (%)	108,662708	23,412091	3,501732

V. CONCLUSÕES

A combinação dos algoritmos VMD, seguido da estimação dos parâmetros e reconstrução do sinal utilizando-se o método de Prony se mostrou uma boa ferramenta para análise de sinais que possuem oscilações de baixa frequência pois, quando comparados com os parâmetros gerados para o sinal original de entrada, permitiu encontrar uma baixa taxa de erro percentual absoluto médio conforme observado na tabela IV, sendo o pior erro de 16,02% para EMR_σ do fator de decaimento no

ruído de 35 dB e o menor erro de 0,049% para o EMR_f da frequência no ruído de 60 dB.

A etapa de processamento via algoritmo de VMD mostrou-se fundamental para a separação dos modos de frequências e, com isso, permitir extrair e analisar apenas o componente de baixa frequência, além de filtrar de maneira considerável o ruído presente no sinal original. O método de Prony foi capaz de estimar os parâmetros de amplitude, fase, frequência e fator de decaimento do modo de baixa frequência separado anteriormente pelo VMD sem a necessidade de nenhum outro pré processamento para preparação do sinal como outro método de filtragem de ruído, por exemplo.

O método proposto apresenta dificuldade para estimar o parâmetro do fator de decaimento quando o sinal não possui um número de pontos suficientemente grande, isso se deve a lenta variação no amortecimento da componente de LFO. Uma melhoria na estimação desse parâmetro poderá ser aprimorada em trabalhos futuros. Além disso, o desenvolvimento de uma lógica capaz de estimar o número de modos do VMD de maneira automática também é um ponto interessante para ser futuramente aprimorado.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer à UFJF, FAPEMIG, INERGE, CNPq e CAPES pelo apoio que permitiu a execução deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- [1] K. Prasertwong, N. Mithulananthan, and D. Thakur, "Understanding low-frequency oscillation in power systems," *International Journal of Electrical Engineering Education*, vol. 47, no. 3, pp. 248–262, 2010.
- [2] A. Pathak and R. Gupta, "Low-frequency oscillation in power system," *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering*, vol. 9, no. 3S2, 2020.
- [3] Y. Zhang, P. Zhao, Z. Han, L. Yang, and J. Chen, "Low frequency oscillation mode identification algorithm based on vmd noise reduction and stochastic subspace method," in *2022 Power System and Green Energy Conference (PSGEC)*. IEEE, 2022, pp. 848–852.
- [4] D. Lauria and C. Pisani, "On hilbert transform methods for low frequency oscillations detection," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 8, no. 6, pp. 1061–1074, 2014.
- [5] J. G. Philip and T. Jain, "Analysis of low frequency oscillations in power system using emo esprit," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 95, pp. 499–506, 2018.
- [6] X. Xia, C. Li, and W. Ni, "Dominant low-frequency oscillation modes tracking and parameter optimisation of electrical power system using modified prony method," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 11, no. 17, pp. 4358–4364, 2017.
- [7] K. Dragomiretskiy and D. Zosso, "Variational mode decomposition," *IEEE transactions on signal processing*, vol. 62, no. 3, pp. 531–544, 2013.
- [8] N. E. Huang, Z. Shen, S. R. Long, M. C. Wu, H. H. Shih, Q. Zheng, N.-C. Yen, C. C. Tung, and H. H. Liu, "The empirical mode decomposition and the hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis," *Proceedings of the Royal Society of London. Series A: mathematical, physical and engineering sciences*, vol. 454, no. 1971, pp. 903–995, 1998.
- [9] S. L. Marple Jr and W. M. Carey, "Digital spectral analysis with applications," 1989.
- [10] A. Fernández Rodríguez, L. de Santiago Rodrigo, E. López Guillén, J. M. Rodríguez Ascariz, J. M. Miguel Jiménez, and L. Boquete, "Coding prony's method in matlab and applying it to biomedical signal filtering," *BMC bioinformatics*, vol. 19, pp. 1–14, 2018.
- [11] V. R. Carvalho, M. F. Moraes, A. P. Braga, and E. M. Mendes, "Evaluating five different adaptive decomposition methods for eeg signal seizure detection and classification," *Biomedical Signal Processing and Control*, vol. 62, p. 102073, 2020.