

Suavizando o efeito de maré nos testes de formação

Felipe de Oliveira, Andréa Lins e Lins Souza, Abelardo Barreto e Sinésio Pesco

Departamento de Matemática

PUC-Rio

Email: felipeoliveira1407@gmail.com, andlins2@mat.puc-rio.br, abelardo.puc@gmail.com e sinesio@puc-rio.br

Resumo—Petróleo e gás são as maiores fontes de energia do mundo. A extração destas importantes fontes tem custos elevados, sendo então necessária a realização de testes a fim de diminuir erros e custos. Alguns desses testes – como o teste de formação – se baseiam nos dados de pressão obtidos em um reservatório. No entanto, esses dados podem apresentar ruídos causados, inclusive, pela influência da maré. Com isso, este trabalho propõe um método para filtrar o efeito da interferência da maré nos dados de pressão através de técnicas de processamento de sinais que utilizam a transformada de Fourier. Para validar o nosso método, comparamos os dados brutos de pressão com os dados filtrados e utilizamos uma abordagem baseada na derivada da pressão para analisarmos os resultados.

Abstract—Oil and gas are the world's largest energy sources. The extraction of these important sources has high costs, being necessary to carry out tests in order to reduce errors and costs. Some of these tests – such as the well test – are based on the pressure data obtained in a reservoir. However, these data may present noises caused even by the influence of the tide. Thereby, this work proposes a method to filter the effect of tidal interference on pressure data through signal processing techniques using the Fourier transform. To validate our method, we compare the raw pressure data with the filtered data and use a pressure derivative approach to analyze the results.

I. INTRODUÇÃO

A maior parte da energia utilizada no mundo é derivada dos hidrocarbonetos que, ao considerar o petróleo e o gás, contribuem com cerca de 60% para a matriz energética mundial. No Brasil, cerca de 90% da produção petrolífera é proveniente de bacias sedimentares. Nelas, o investimento necessário para extrair os recursos é bastante elevado, podendo chegar a milhões de dólares em operações *offshore*¹ [1].

Tendo em vista os altos custos, é necessária a realização de testes a fim de obter informações sobre o poço de petróleo antes de ser feita a operação de exploração dos recursos, possibilitando assim, a redução desses custos. Um desses testes é o chamado *teste de formação*, que consiste em coletar dados de pressão em função do tempo [2].

Exatamente nas operações *offshore* – nas quais há custo e produtividade maiores – existe o agravamento de um efeito que afasta os resultados brutos dos testes daqueles almejados para a análise: o *efeito das marés*. Tal efeito aparece como um ruído indesejado nos dados de pressão [3], [4]. Diante disso, faz-se necessário utilizar ferramentas computacionais que permitam filtrar esse ruído, melhorando, assim, a leitura e interpretação dos dados.

Sendo assim, o objetivo deste trabalho é diminuir a interferência do efeito da maré em dados de pressão coletados em testes de formação. Para isso, implementamos um método para filtrar tal efeito, que utiliza como ferramenta principal a Transformada Discreta de Fourier (DFT). O nosso método é dividido em etapas, dentre elas destacamos a *reamostragem* que utiliza uma interpolação linear dos dados e a *filtragem*, que, por sua vez, emprega a Transformada Discreta do Seno (DST) e um filtro Gaussiano. Em seguida, faremos um comparativo dos dados brutos com os dados filtrados. E, por fim, utilizaremos a derivada da pressão para analisarmos e validarmos os resultados obtidos através do método proposto.

A. Trabalhos Relacionados

Nesta subseção apresentaremos alguns trabalhos relacionados que serviram como incentivo para o nosso trabalho.

O efeito das marés nos reservatórios de petróleo foi observado por diversos autores a partir da década de 70, o que motivou vários estudos cujo objetivo era extrair tal ruído [3], [4]. Um dos métodos utilizados foi a regressão não linear, sendo os pontos onde a amplitude devido ao efeito de maré era zero utilizados para extrair a tendência média [5]. Na mesma época outros autores, como Arditty *et al.* [4], utilizaram a Transformada Rápida de Fourier (FFT) para analisar a relação do efeito de maré com as características do reservatório.

Zhao & Reynolds [6] analisaram o efeito da maré nos testes *onshore*² e *offshore*. Em poços *onshore* aplicaram o filtro Savitzky-Golay (SG) para identificar o efeito da maré, utilizaram a técnica dos mínimos quadrados com dados de pressão modificados e removeram o efeito de maré ao subtrair a série obtida pelo ajuste de mínimos quadrados do sinal verdadeiro. Eles fizeram algo similar para poços *offshore*.

Já os autores de Araujo *et al.* [7] optaram por utilizar a Transformada Rápida de Fourier (FFT) com o intuito de eliminar frequências indesejadas. Os resultados obtidos em três conjuntos de dados, comprovou que o método pode ser aplicado com eficácia em testes de poços. Em nosso método, optamos por utilizar uma derivada da Transformada Discreta de Fourier (DFT), a saber, a Transformada Discreta do Seno (DST), pois queremos evitar ter que lidar com números complexos, como veremos em mais detalhes na Seção III.

II. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Nesta seção, apresentaremos os fundamentos teóricos necessários para a descrição e implementação do método proposto.

¹palavra inglesa para denotar em alto mar

²palavra inglesa para denotar poço na costa ou no interior do continente

A. Transformadas Discretas de Fourier

A Transformada de Fourier é muito utilizada em diversas áreas, tendo destaque em processamento de sinais e imagens, como em análise de sinais biológicos [8], filtragem de ruídos em imagens e realce de contornos de imagens médicas [9].

A Transformada Discreta do Seno (DST) deriva diretamente da Transformada Discreta de Fourier (DFT), a qual pode ser obtida através da Transformada Rápida de Fourier (FFT), por ter essa última, um algoritmo mais eficiente para se calcular a DFT e sua inversa. Mais informações podem ser obtidas em [10], [11] e [12]. A seguir veremos uma breve descrição de algumas dessas transformadas:

Dado um sinal $x = (x(1), \dots, x(N))$. Então, a FFT é definida por

$$FFT(x)(k) = \sum_{j=1}^N x(j)w_N^{(j-1)(k-1)}. \quad (1)$$

onde $w_N = \exp(-\frac{2\pi i}{N})$. A FFT inversa de $a = (a(1), \dots, a(N))$ é definida por

$$IFFT(a)(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N a(k)w_N^{-(k-1)(n-1)}. \quad (2)$$

Já a DST é dada por:

$$DST(x)(k) = \sum_{n=1}^N \sin\left(\pi \frac{kn}{N+1}\right). \quad (3)$$

E, por fim, a DST inversa de a é

$$IDST(a)(n) = \frac{2}{N+1} \sum_{k=1}^N a(k) \sin\left(\pi \frac{kn}{N+1}\right). \quad (4)$$

B. Solução da linha fonte

Nesta subseção faremos uma apresentação de uma equação que será de extrema importância para verificar os resultados obtidos com o método. Para mais informações, consulte [13].

A pressão se relaciona com o tempo adimensional (t_D) e com o raio adimensional (r_D) pelo que conhecemos como *solução da linha fonte*, a qual é dada pela seguinte equação:

$$P_D(r_D, t_D) = - \left[\frac{1}{2} E_i \left(- \frac{r_D^2}{4t_D} \right) \right], \quad (5)$$

onde E_i é dado por:

$$E_i(-x) = - \int_x^\infty \frac{e^{-x}}{x} dx \quad (6)$$

Porém, tomando um regime de fluxo radial infinito, podemos tomar a seguinte aproximação:

$$P_{wD}(t_D) = \frac{1}{2} \ln \left(\frac{4t_D}{e^\gamma} \right) \quad (7)$$

onde $\gamma = 0.5772$ é a constante de Euler. O que, pela regra da cadeia implica que:

$$P'_{wD} = t_D \frac{dP_{wD}}{dt_D} = t_D \frac{d}{dt_D} \left(\frac{1}{2} \ln \left(\frac{4t_D}{e^\gamma} \right) \right) = t_D \left(\frac{1}{2t_D} \right) = \frac{1}{2} \quad (8)$$

C. Derivada de Bourdet

Na fase de interpretação dos dados coletados em testes de formação, é comum utilizar a derivada da pressão devido ao resultado obtido na Equação 8. Um método para calcular tal derivada, conhecido como método da *derivada de Bourdet* [2], tem como equação:

$$\Delta p'(t_j) = \frac{\Delta p(t_{j+1}) - \Delta p(t_j)}{\ln(t_{j+1}/t_j)} \frac{\ln(t_j/t_{j-1})}{\ln(t_{j+1}/t_{j-1})} + \frac{\Delta p(t_j) - \Delta p(t_{j-1})}{\ln(t_j/t_{j-1})} \frac{\ln(t_{j+1}/t_j)}{\ln(t_{j+1}/t_{j-1})}, \quad (9)$$

onde Δp é a variação da pressão e t , o tempo.

III. FILTRAGEM DOS EFEITOS DA MARÉ

Nesta seção iremos apresentar o método proposto neste trabalho.

Nosso processo se resume em três partes: a *reamostragem* do sinal inicial, a *filtragem* da parte estacionária do sinal e a *união* da parte estacionária com a transiente. No caso em consideração, decompomos o sinal em $S + R$, onde R é um ruído periódico. Um tal ruído deve ter um pico de frequência elevado [14] e uma forma de eliminá-lo é amortecer as frequências. Na prática isto foi feito multiplicando a transformada de Fourier por uma exponencial decrescente. As transformadas de Fourier descrevem as frequências encontradas em um sinal. Optamos por utilizar a DST em vez da FFT a fim de evitar números complexos. As duas formas são conceitualmente equivalentes, sendo a DST apenas uma extensão ímpar da FFT. No caso optamos por utilizar a DST olhando para o aspecto do sinal: a sua extensão ímpar pareceu mais suave no bordo que a extensão par. A suavidade do sinal no bordo é importante para evitar a criação de altas frequências inexistentes no sinal original.

A. Reamostragem

Em nosso método, primeiramente precisamos ter uma distribuição uniforme dos dados de pressão no tempo. Seja P_i a pressão medida no tempo t_i . Seja N o número de medidas feitas. O primeiro passo é calcularmos:

$$\delta = \frac{(t_N - t_1)}{N} \quad (10)$$

e o sinal reamostrado é tal que $\bar{s}_i = (\bar{t}_i, \bar{P}_i)$, $\bar{t}_{j+1} - \bar{t}_j = \delta$ e os dados de pressão $\bar{P}_i$ são obtidos por interpolação linear dos dados de pressão P_i .

B. Filtragem

Considere $Y = (\bar{P}_1, \dots, \bar{P}_N)$ o sinal reamostrado das pressões. Utilizamos o seguinte processo:

- Calculamos a transformada do seno (DST) de Y .

$$U = DST(Y) \quad (11)$$

- Multiplicamos U pela resposta de frequência do filtro, obtendo H . No caso utilizamos o filtro Gaussiano

$$H(t) = \exp(-at^2), \quad (12)$$

tal que

$$h_i = u_i \exp(-at_i^2), \quad (13)$$

onde $a = 10^{-4}$, nos nossos exemplos.

c) Calculamos a DST inversa de H :

$$Z = IDST(H) \quad (14)$$

C. União

Nessa parte fazemos a união da parte estacionária do sinal com o último resultado obtido na IDST usando as funções α e G definidas a seguir:

$$\alpha(t, t_0, \lambda) = G\left(\frac{t - t_0}{\lambda}\right) \quad (15)$$

onde

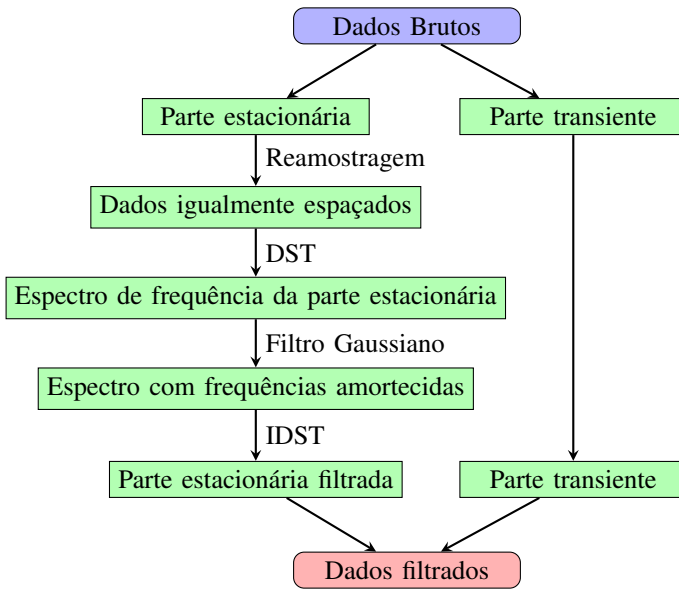
$$G(u) = \begin{cases} 0, & \text{se } u \leq -1, \\ \frac{1}{2} + \frac{15}{16}u - \frac{5}{8}u^3 + \frac{3}{16}u^5, & \text{se } -1 \leq u \leq 1, \\ 1, & \text{se } u \geq 1. \end{cases}$$

A justificativa para o uso da função G acima pode ser encontrada em [15].

Finalmente, unimos os dados originais com os dados filtrados pela interpolação $p(t)$:

$$p(t) = (1 - \alpha(t)).Y(t) + \alpha(t).Z(t) \quad (16)$$

O fluxograma a seguir resume o processo:



Conforme visto na Equação 8, nossa intenção é que, ao ser realizado o cálculo da derivada da pressão com relação ao logaritmo natural do tempo, o resultado obtido seja constante e igual a $\frac{1}{2}$, ou a uma aproximação significativa desse resultado.

IV. RESULTADOS

Aplicando o processo visto na Seção III a dados de pressão coletados em testes de formação, obtivemos os seguintes resultados:

A. Exemplo 1

Neste exemplo utilizamos $N = 3289$ pares ordenados (P_i, t_i) . A Figura 1 exibe o sinal original em azul e o sinal filtrado em vermelho. Na escala original, o resultado não é evidente (parte superior), mas escolhendo uma escala adequada o resultado fica mais claro (parte inferior).

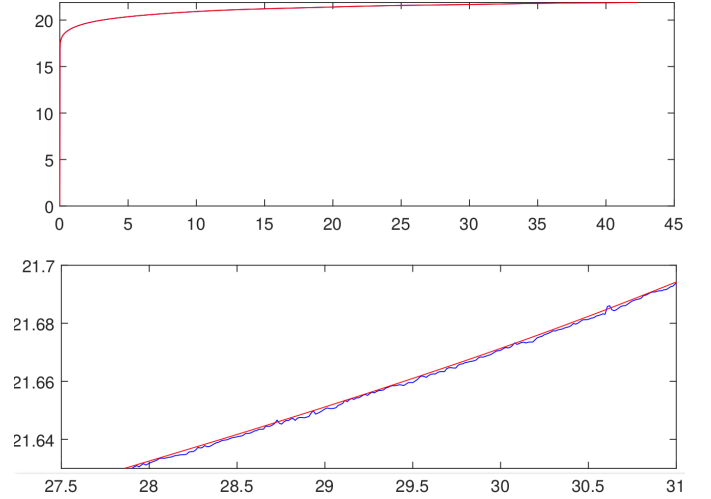


Figura 1. Comparação entre sinal filtrado (vermelho) e original (azul) na escala original (superior) e em uma escala adequada (inferior).

A Figura 2 apresenta, em um gráfico semilogarítmico, a comparação entre o sinal original (azul) e com o ruído retirado (vermelho).

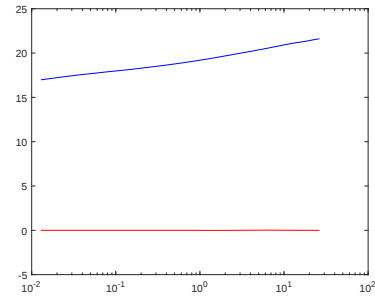


Figura 2. Comparação entre o sinal original (azul) e o ruído filtrado (vermelho).

A Figura 3 apresenta a comparação entre as derivadas dos dados brutos (azul) e os suavizados (vermelho), mostrando a tendência esperada no sinal filtrado. Conforme apresentado na Seção III, temos que o resultado esperado é que a derivada da pressão com relação ao logaritmo do tempo seja uma função constante e igual a $\frac{1}{2}$.

B. Exemplo 2

Neste outro exemplo, utilizamos $N = 9192$ pares ordenados (P_i, t_i) . A Figura 4 ilustra o sinal original (azul) e o sinal filtrado (vermelho) em diferentes escalas. Na parte inferior da figura, o resultado está mais evidente.

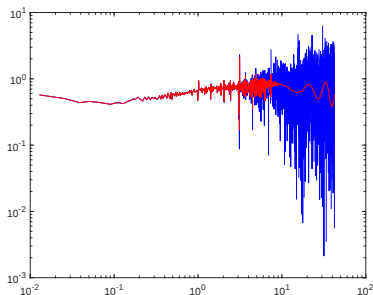


Figura 3. Comparação entre a derivada do sinal filtrado (vermelho) e original (azul) ficando mais próximo da função $\frac{1}{2}$.

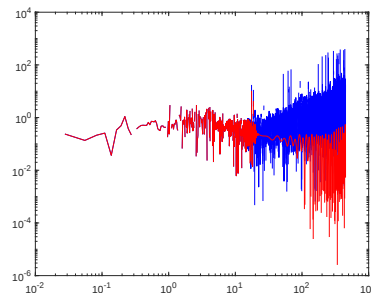


Figura 6. Comparação entre as derivadas do sinal original (azul) e o filtrado (vermelho) com relação ao logaritmo do tempo.

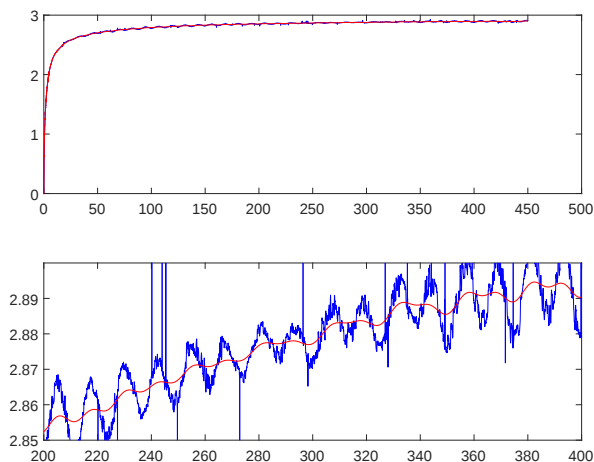


Figura 4. Sinal original (azul) comparado ao sinal filtrado (vermelho) na escala original (superior) e em uma escala adequada (inferior).

Na Figura 5 podemos observar em um gráfico semilogarítmico, a comparação entre o sinal original em azul e o sinal com o ruído removido em vermelho.

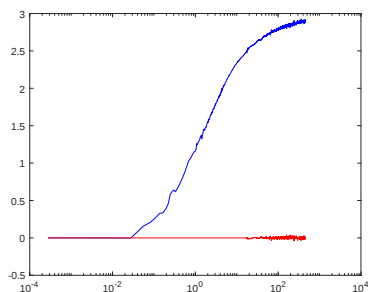


Figura 5. Comparação entre o sinal original (azul) e o filtrado (vermelho).

Já a Figura 6 exibe a derivada da pressão com relação ao logaritmo do tempo. Novamente, os valores obtidos ficaram próximos de $\frac{1}{2}$, como desejávamos.

V. CONCLUSÃO

Neste trabalho foi aplicado um método de filtragem de sinais com o objetivo de remover a perturbação causada pela influência da maré no sinal da resposta de variação de pressão em um teste de poço de petróleo. Para isso, utilizamos a

Transformada Discreta do Seno e, para analisar os resultados, utilizamos um método de análise de testes baseado na derivada da pressão. Obtivemos resultados satisfatórios, já que em ambos os casos, o gráfico da derivada ficou próximo de $\frac{1}{2}$, que era o valor esperado.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à PETROBRAS por financiar parcialmente esta pesquisa através do contrato PT-120.60.10085 - SAP4600456482.

REFERÊNCIAS

- [1] *O Brasil e o Mar no Século XXI - Relatório aos Tomadores de Decisão do País*. CEMBRA, 2012. [Online]. Available: https://www.marinha.mil.br/secirm/sites/www.marinha.mil.br/secirm/files/cembra-2a_ed.pdf
- [2] D. Bourdet, *Well Test Analysis: The use of Advanced Interpretation Models*, ser. Handbook of Petroleum Exploration and Production. Elsevier Science, 2002.
- [3] C. J. Strobel and M. S. Gulati, "Reservoir limit tests in a naturally fractured reservoir - a field case study using type curves," vol. 28, pp. 1097–1106, 09 1976.
- [4] P. C. Arditty, H. J. R. Jr, and A. M. Nur, "Response of a closed well-reservoir system to stress induced by earth tides," in *SPE Annual Fall Technical Conference and Exhibition*. Society of Petroleum Engineers, 1978.
- [5] P. A. Witherspoon, T. N. Narasimhan, and D. McEdwards, "Results of interference tests from two geothermal reservoirs," 01 1978.
- [6] Y. Zhao and A. C. Reynolds, "Estimation and removal of tidal effects from pressure data," in *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. Society of Petroleum Engineers, 2006.
- [7] M. A. R. De Araujo, W. Campos, and R. Z. Moreno, "Filtering of tide effects in formation evaluation," in *SPE Latin America and Caribbean Petroleum Engineering Conference*. Mexico City, Mexico: Society of Petroleum Engineers, 2012.
- [8] K. Najarian and R. Splinter, *Biomedical Signal and Image Processing*. CRC Press - Taylor Francis Group, 2006.
- [9] S. K. Mitra, *Digital Signal Processing: A Computer bases approach*. McGraw-Hill, 1998.
- [10] A. Oppenheim, A. Willsky, and S. Nawab, *Signals and Systems*, ser. Prentice-Hall signal processing series. Prentice Hall, 1997.
- [11] S. Damelin and W. Miller, *The Mathematics of Signal Processing*, ser. Cambridge Texts in Applied Mathematics. Cambridge University Press, 2011.
- [12] N. Ahmed, T. Natarajan, and K. R. Rao, "Discrete cosine transform," *IEEE Trans. Comput.*, vol. 23, no. 1, pp. 90–93, Jan. 1974. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1109/T-C.1974.223784>
- [13] D. Horner, *Pressure Build-up in Wells*. E.J. Brill, 1951.
- [14] R. BRACEWELL, *The Fourier transform and its applications*. McGraw-Hill, 2000.
- [15] M. d. O. L. Ferreira, A. L. Bordignon, F. Petronetto, Á. Veiga, G. T. d. Santos, T. M. Lewiner, and H. C. V. Lopes, "Approximations by smooth transitions in binary space partitions," in *Proceedings of the XXI Brazilian Symposium on Computer Graphics and Image Processing*. Los Alamos: IEEE Press, 2008.