

Geração de Perfil Sônico Sintético em Poços de Petróleo Através dos Modelos de Regressão Não Lineares Usando a Profundidade como Variável Regressora

E. S. Chagas¹; S. L. Russo¹; V. H. Simon²

¹*Departamento de Estatística e Ciências Atuariais, Universidade Federal de Sergipe, 49100-000, São Cristóvão-SE, Brasil*

²*PETROBRAS, 49.080-010, Aracaju-SE, Brasil*
evelynschagas@hotmail.com

(Recebido em 31 agosto de 2010; aceito em 20 de dezembro de 2010)

A importância da aquisição do perfil sônico, além da estimativa da porosidade das rochas atravessadas, reside na possibilidade da amarração da interpretação sísmica, em tempo, com as unidades geológicas cortadas pelos poços, em profundidade. Como a maioria dos poços exploratórios não dispõe desse perfil de poço e é inviável economicamente fazer uma nova aquisição recorreu-se a modelos de regressões não lineares para fazer uma estimativa do perfil sônico, dito "sônico sintético". Escolheu-se usar os modelos não lineares, pelo fato dos dados não apresentarem uma distribuição normal. Assim, esse trabalho visa determinar um modelo que gere perfis sônicos sintéticos em poços de petróleo perfurados nas unidades geológicas pertencentes à Bacia Sedimentar Sergipe-Alagoas e que estejam dentro dos padrões de qualidade necessários. O software utilizado para a realização desses cálculos foi o SAS Enterprise Guide. Este trabalho tem o apoio financeiro da FAPITEC.

Palavras-chave: Perfil Sônico Sintético, Regressão Não linear, Poços Exploratórios.

The importance of to acquire the sonic profile, in addition to estimating the porosity of the rocks crossed, is the possibility of tying the seismic interpretation, in time, with the geological units cut by the wells in depth. Since most wells Exploration not have this profile well and is not economically viable to do a new acquire, resort the nonlinear regression models to estimate the sonic profile, called "sonic synthetic." Chose to use nonlinear models, because the data did not show a normal distribution. Thus, this study aims to determine a model that generates synthetic sonic profiles in oil wells drilled into geological units belonging to the Sergipe-Alagoas Basin and that are within the standards of quality required. The software used to achieve these calculations was SAS Enterprise Guide. This work has the financial support of FAPITEC.

Keywords: Profile synthetic sonic, Nonlinear regression, Wells exploitation

1. INTRODUÇÃO

A necessidade da utilização do petróleo como combustível em diversos seguimentos da indústria por todo o mundo, aliado com as elevações progressivas no preço do barril de petróleo, leva as empresas exploradoras a extrair o máximo de suas jazidas e obter o menor custo possível. Desta forma, a otimização do desenvolvimento dos reservatórios passou a ser fundamental para o sucesso da indústria do petróleo, e a sísmica, que até então não era empregada de maneira sistemática no desenvolvimento dos campos de petróleo, passou a ser vista como ferramenta potencial para esse propósito [1].

O perfil sônico é utilizado na construção de sismogramas sintéticos, que são obtidos usando-se um algoritmo próprio e tem por finalidade auxiliar na interpretação dos horizontes sísmicos, permitindo correlacionar esses horizontes com os níveis estratigráficos atravessados pelo poço perfurado, além de propiciar a criação de tabelas de conversão tempo versus profundidade, o que permite migrar toda uma interpretação sísmica, que está no domínio do tempo, para o domínio do espaço (profundidade).

Como não é viável economicamente fazer uma aquisição do perfil sônico, na grande maioria dos poços antigos, principalmente em decorrência da parada da produção do óleo, para contornar a falta de informação, deve-se recorrer a outros meios para solucionar o problema.

Uma das maneiras é, utilizar métodos estatísticos que gerem um perfil sônico, dito sintético, para estabelecer estimativas das velocidades sísmicas das rochas ao longo dos poços (RUSSO, 2008). [2].

Assim, esse estudo objetiva aplicar os modelos básicos da regressão não linear a fim de encontrar uma equação não linear do perfil sônico de modo a observar o seu comportamento nos poços de petróleo e relacioná-la a variável de perfil profundidade.

2. REVISÃO TEÓRICA

2.1. PERFILAGEM

O perfil de um poço é a imagem, ao longo da profundidade, de uma ou mais características ou propriedades de uma estratigrafia atravessada pelo poço. [3].

Perfilagem de poço é a realização de um perfil em um poço, vertical ou inclinado, com medições de determinados parâmetros. O perfil é traçado a partir de uma sonda que é içada ao longo do poço onde o perfil do parâmetro medido é registrado simultaneamente. Em uma mesma sonda, mais de um parâmetro pode ser medido. [3].

A perfilagem é uma das mais úteis e importantes ferramentas disponíveis no setor petrolífero, sendo utilizada quase sem exceção em todos os poços perfurados. Nos casos mais extremos, seus custos não superam 5% do custo total de um poço. É através da perfilagem que se pode obter medidas contínuas, ao longo de um poço, de diferentes propriedades das formações. A partir da interpretação destas medidas, podem-se identificar zonas produtivas, distinguir óleo, gás ou água em um reservatório, e estimar a reserva de hidrocarbonetos, além de suas utilizações mais tradicionais na exploração, como correlação entre níveis estratigráficos, auxílio na confecção de mapas e calibração sísmica. [1].

PERFIL SÔNICO

O perfil sônico é utilizado, principalmente em poços pioneiros, que recebem maiores investimentos para aquisição de dados, pois esses poços servem como referência para analisar o potencial petrolífero da área. Já para poços considerados de exploração, normalmente não são corridas as ferramentas sônicas por motivos econômicos, principalmente nos tempos de preço de petróleo baixo. O perfil normalmente utilizado para avaliar a porosidade é o perfil de densidade. [2].

A ferramenta sônica consiste, basicamente, no registro do tempo decorrido entre o momento em que um pulso sonoro compressional é emitido por um transmissor, montado em um mandril no interior do poço, até sua chegada a dois receptores distintos sobre o mesmo mandril. A diferença entre os dois tempos de chegada (transmissor - receptor perto T-RP e transmissor - receptor longe T-RL) é chamada de tempo de trânsito ou *delay time* (DT). [1].

A velocidade de propagação do som na rocha é dada pelo inverso do tempo necessário para que uma onda percorra a formação na distância de um pé (0,3048 m). É importante para se encontrar a curva de impedância acústica que é dada pela multiplicação da velocidade pela densidade. A partir dessa curva, consegue-se encontrar o coeficiente de refletividade que irá se convolver com ondas compressionais e gerar um sismograma sintético (traço sísmico). A formação desse traço será útil para fazer a amarração entre os registros da seção sísmica de superfície que é medido no domínio do tempo com as ferramentas de perfilagem que são medidas no domínio da profundidade. O sismograma sintético é mostrado na Figura 1: [4, 5].

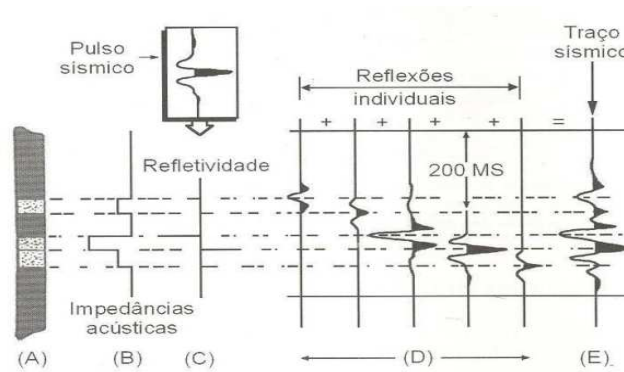


Figura 1: Passos para geração de um sismograma sintético.

O tempo de trânsito (DT) guarda uma relação direta com a porosidade da rocha. Quanto maior o DT, maior a separação entre os grãos, portanto, maior a porosidade, sendo a recíproca verdadeira. Conseqüentemente, a maior vantagem do perfil sônico provém da relação direta que existe entre o tempo de trânsito de uma onda sonora em uma rocha e a sua porosidade. [6]. Elevados tempos do DT podem representar fraturas, desmoronamentos ou até mesmo presença de gás no poço. [1]. A fórmula para a estimativa da porosidade está representada na equação 1: [6].

$$\frac{1}{Vp} = \frac{\phi}{Vf} + \frac{1-\phi}{Vm} \quad (1)$$

Onde:

Vp: velocidade média compressional na rocha

Vm: velocidade da matriz da rocha

Vf: velocidade da onda no fluido

Φ : porosidade

MODELOS DE REGRESSÃO

A análise de regressão consiste em um método de modelagem que avalia a relação entre uma variável dependente contínua Y e uma ou mais variáveis contínuas independentes X_1, X_2, \dots, X_k . O objetivo da análise de regressão é identificar a função que descreve, da melhor forma, a relação entre essas variáveis para que se possa prever que valor a variável dependente vai assumir quando forem atribuídos valores para a variável independente (RAGSDALE, 2001; SUBRAMANIAN ET AL., 2007; RUSSO ET AL 2010). [7].

O MODELO DE REGRESSÃO NÃO LINEAR

Chama-se não linear um modelo de regressão da forma:

$$Y = f(X, \beta) + u \quad (2)$$

em que \mathbf{Y} designa um vetor (nx1) de observações de uma variável aleatória \mathbf{Y} , \mathbf{X} é uma matriz (nxp) de observações de p variáveis não aleatórias (que inclui, possivelmente, uma variável identicamente igual a 1), β é um vetor (Kx1) de parâmetros desconhecidos, \mathbf{u} é um vetor (nx1) de perturbações aleatórias e $f(\mathbf{X}, \beta)$ é um vetor (nx1) de funções não lineares de β , contínuas e diferenciáveis no espaço dos parâmetros, B. [8].

FUNÇÕES NÃO LINEARES

Uma reta pode ser usada para ajustar qualquer conjunto de dados. Mas nem sempre o ajustamento por uma reta é bom. Quando isso ocorre, devemos tentar outros tipos de funções,

genericamente chamadas de funções não lineares. Ao longo dos tempos, grandes matemáticos dedicaram-se ao estudo das funções não lineares, obtendo suas equações, propriedades e curvas características. [9].

Função exponencial

A função exponencial $\hat{y} = a.e^{bx}$ é muito útil para os casos em que a variável dependente varia com uma taxa percentual constante. Aplicando logaritmo nos dois membros dessa função exponencial, temos a expressão linear $\ln \hat{y} = \ln a + bx$. Para realizar essa transformação, deve-se proceder como segue:

- Os valores da amostra y devem ser transformados em $\ln y$, formando a nova amostra com valores $\ln y$. Os valores da amostra x permanecem sem transformação.
- Com os valores das novas variáveis x e $\ln y$:
 - Calcule os coeficientes de regressão, intercepto h e declividade k . Foram adicionados as novas constantes h e k para distingui-las dos coeficientes da função exponencial a e b .
 - Calcule o coeficiente de determinação r^2 .
- Calcule os coeficientes da função exponencial a e b , tendo presente:
 - Como o intercepto h da reta é $\ln a$, o coeficiente $a = e^h$
 - A declividade K é o próprio coeficiente $b = k$. [10].

A função exponencial apresenta restrições para sua existência tais como: $a \neq 0$, $b > 0$ e $b \neq 1$. Se $a = 0$ ou $b = 1$, a função é constante ($y = c$ ou $y = a + c$), e se $b < 0$, a função é oscilante. [9].

Função logarítmica

A função logarítmica $\hat{y} = a + b.\ln x$ já é uma expressão linear. Entretanto, os valores da variável x devem ser transformados:

- Os valores da amostra y permanecem sem transformação, e os valores da amostra x devem ser transformados em $\ln x$, formando a nova amostra com valores $\ln x$.
- Com os valores das novas variáveis y e $\ln x$:
 - Calcular os coeficientes de regressão, intercepto h e declividade k para distingui-los dos coeficientes da função exponencial a e b .
 - Calcular o coeficiente de determinação r^2 .
- Calcular os coeficientes da função logarítmica a e b , considerando que:
 - O intercepto h é o próprio coeficiente $a = h$.
 - A declividade k é o próprio coeficiente $b = k$. [10].

A função logarítmica apresenta restrições para sua existência tais como: $a \neq 0$, $b > 0$ e $x > 0$. Se $a = 0$, a função é constante ($y = c$); e se $b < 0$ ou $x < 0$, logaritmo não existe. [9].

Função potência (ou geométrica)

A função potência $\hat{y} = a.x^b$ é muito útil para negócios, principalmente a curva de aprendizado. Aplicando logaritmos nos dois membros da função potência, temos a expressão linear $\ln \hat{y} = \ln a + b.\ln x$. Para realizar essa transformação, deve-se proceder assim:

- Os valores da amostra y devem ser transformados em $\ln y$ formando a nova amostra com valores $\ln y$.

- Os valores da amostra x devem ser transformados em $\ln x$ formando a nova amostra com valores $\ln x$.
- Com os valores das novas variáveis $\ln y$ e $\ln x$:
 - Calcule os coeficientes de regressão, intercepto h e declividade k para distingui-los dos coeficientes da função potência a e b .
 - Calcule o coeficiente de determinação r^2 .
- Calcule os coeficientes da função potência a e b , considerando que:
 - Se o intercepto h da reta é $\ln a$, então o coeficiente $a = e^h$.
 - A declividade k é próprio coeficiente $b = k \cdot [10]$.

A função potência apresenta restrições para sua existência tais como: $a \neq 0$ e $b \neq 0$. Se isso ocorrer, a função é constante ($y = c$ ou $y = a + c$). [9].

Função trigonométrica

Uma “função trigonométrica” nada mais é do que uma relação entre as medidas de um triângulo retângulo, referidas a certo ângulo (catetos e hipotenusa). [9]. Conforme as medidas tomadas obtêm-se:

- Seno - é a razão existente entre o cateto oposto ao ângulo e a hipotenusa do triângulo retângulo. É representado por: $y = a \cdot \text{sen}x$.
- Cosseno - é a razão existente entre o cateto adjacente ao ângulo e a hipotenusa do triângulo retângulo. É representado por: $y = a \cdot \text{cos}x$.
- Tangente - é a razão existente entre o cateto oposto e o cateto adjacente de um dos ângulos de um triângulo retângulo (ou entre o seno e cosseno do ângulo especificado). É representada por: $y = a \cdot \text{sen}x / \text{cos}x$.

Curva de Agnesi

A equação geral da curva de Agnesi é dado por:

$$Y = \frac{a}{a + bX^2} \quad (3)$$

A Curva de Agnesi apresenta restrições para sua existência tais como: $a \neq 0$ e $b \neq 0$. Além disso, é fácil ver que se $a = \text{cte}$, o aumento de b produz uma compressão da curva. Da mesma forma, se $b = \text{cte}$, então o aumento de a expande a curva. [9].

Curva de Gauss

A equação geral da curva de Gauss é dada por: [9].

$$Y = e^{-kx^2} \quad (4)$$

Cônicas (Funções Quadráticas)

Chama-se de “cônica” uma curva produzida pela seguinte função:

$$Y = ax^2 + bxy + cy^2 + ey + f \quad (5)$$

A Cônica apresenta restrições para sua existência tais como: $a \neq 0$ ou $c \neq 0$.

A equação geral de uma função quadrática representa uma parábola, uma hipérbole, uma elipse ou uma circunferência conforme os valores dos parâmetros. Se $b=0$, a curva pode ser identificada do seguinte modo: ela é uma parábola se um dos coeficientes dos termos elevados ao quadrado é zero ($a \neq 0$ ou $c \neq 0$, mas não ambos) se esses mesmos coeficientes forem diferentes de zero e tiverem sinais opostos, então a curva é uma hipérbole; por fim, se eles tiverem o mesmo sinal, a curva é uma elipse, a qual reduz-se a uma circunferência se a é igual a c em sinal e em valor absoluto. [9].

VERIFICAÇÃO DO MODELO

Um gráfico dos pares observados (x_i, y_i) é o primeiro passo necessário para determinar a forma de uma relação matemática entre x e y . É possível ajustar aos dados várias funções diferentes da função linear ($y = b_0 + b_1x$), usando o princípio dos mínimos quadrados ou outro método de aderência. Uma vez que uma função da forma escolhida é ajustada ou aderida, é fundamental verificar a aderência do modelo para confirmar se é de fato apropriado. Uma maneira de avaliar é sobrepor um gráfico da função mais bem aderida ou ajustada no gráfico de dispersão dos dados. [11].

O COEFICIENTE DE DETERMINAÇÃO MÚLTIPLO

O coeficiente múltiplo de determinação R^2 mede o grau de ajuste da equação de regressão; ou seja, fornece a proporção ou porcentagem da variação total na variável dependente Y explicada conjuntamente pelas variáveis independentes X_1, X_2, \dots, X_n . [12].

OS RESÍDUOS

Para verificar se um modelo é adequado, é necessário investigar se as suposições feitas para o desenvolvimento do modelo estão satisfeitas. Para tanto, estuda-se o comportamento do modelo usando o conjunto de dados observados, notadamente as discrepâncias entre os valores observados e os valores ajustados pelo modelo, ou seja, faz-se a análise dos resíduos. [13].

Pode-se avaliar a adequação do modelo de regressão ajustado plotando os resíduos no eixo vertical e os valores correspondentes aos valores de X_i da variável independente no eixo horizontal. Se o modelo ajustado for apropriado para os dados, não haverá padrão aparente de resíduos em relação a X_i . No entanto, se o modelo ajustado não for apropriado, existirá uma relação entre os valores de X_i e os resíduos e_i . [14].

3. METODOLOGIA

O conjunto de dados analisados trata-se de informações das variáveis de perfis de poços que medem propriedades das rochas atravessadas por esses poços, pertencentes a unidades geológicas da Bacia Sergipe-Alagoas de um campo de petróleo da Bacia Sedimentar Sergipe Alagoas. Alguns desses poços dispõem de um conjunto completo de perfis, inclusive o sônico. Serão identificadas as possíveis estratificações das amostras como: profundidade, tipos litológicos (composicionais), entre outros.

As variáveis de perfis a serem analisadas serão a (Prof) Profundidade e o (DT) sônico. Esse estudo será realizado em cinco poços de petróleo.

O procedimento empregado consistirá na verificação do comportamento da variável (Prof) em relação à variável DT. Serão aplicados alguns modelos de regressão não lineares, tais como: função exponencial, função quadrática, função de potência, entre outros.

Para garantir a qualidade dos resultados será efetuada a verificação do coeficiente de determinação e o MAPE. O software utilizado para o cálculo das medidas estatísticas e a construção dos gráficos foi o SAS Enterprise Guide.

3.1. CARACTERIZAÇÃO DAS VARIÁVEIS DE PERFIS:

3.1.1. Profundidade – *Prof*: é a profundidade do ponto de leitura dentro do poço. Sua escala de medida é em metros. Seu referencial de medida, isto é, o zero, é a Mesa Rotativa (MR) da sonda de perfuração, que em geral é um número menor que 10 metros. Para ser corrigida ao Nível Topográfico basta subtrair a MR. A profundidade é uma variável que para ser usada adequadamente requer o conhecimento da geologia da área, isto é: estar familiarizado com os diferentes *Níveis Estratigráficos*. A sua correlação com outras variáveis de perfis requer uma interpretação geológica. De forma geral a velocidade sônica das rochas ($1/DT$) e a densidade

(RHOB) crescem com a profundidade em função do soterramento e conseqüente compactação das rochas.

3.1.2. Sônico – DT: Mede o tempo necessário para uma onda sonora percorrer um pé de rocha, esse tempo é chamado de tempo de trânsito. Esse tempo é inversamente proporcional a velocidade sônica da rocha. É utilizado para a estimativa da porosidade, correlação de poços, estimativas do grau de compactação das rochas, estimativas das constantes elásticas da rocha, detecção de fraturas e apoio à sísmica (sismograma sintético). É medido em microsegundos por pé.

3.2. CARACTERIZAÇÃO DAS VARIÁVEIS GEOLÓGICAS:

3.2.1 Níveis Estratigráficos – N_{Est} : Esta variável indica os diferentes níveis geológicos atravessados pelos poços. Podem diferir uns dos outros em função de diferentes atributos como idades geológicas das rochas, origens em diferentes ambientes sedimentares que em última análise vão se traduzir em rochas com diferentes composições mineralógicas ocasionando variações dos aspectos físicos e químicos destas rochas. O mais importante é que esses Níveis Estratigráficos podem ser rastreados lateralmente, poço a poço com base em suas assinaturas dos perfis.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

O conjunto de dados analisados trata-se de informações das variáveis de perfis de poços que medem propriedades das rochas atravessadas por esses poços, pertencentes a um campo de petróleo da Bacia Sedimentar Sergipe Alagoas. Alguns desses poços dispõem de um conjunto completo de perfis, inclusive o sônico.

ANÁLISE DO POÇO P1

4.1.1. Análise descritiva das variáveis

Para compreender melhor os dados foi construído o gráfico representativo do perfil sônico (DT) gerado no poço P1, conforme Figura 2.

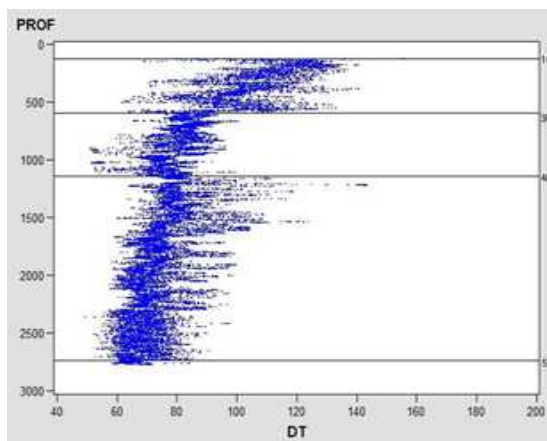


Figura 2 – Gráfico da variável DT versus profundidade

O início do poço P1 em estudo está a 121,25m e o final está a 2769m. Nota-se a existência de uma tendência decrescente nos valores encontrados de DT em direção final do poço. Os registros, da Tabela 1, das estatísticas pelo método dos momentos, apresentam as seguintes características:

Tabela 1 - Resumo das Estatísticas Descritivas

| Variáveis | Média | Mediana | Variância | Desvio Padrão | CV% | Coef. Assimetria |
|-----------|--------|----------|-----------|---------------|----------|------------------|
| PROF | - | 1446,438 | - | - | - | - |
| DT | 81,379 | 77,798 | 237,3 | 15,4045 | 18,92939 | 1,13888 |

Com base na Tabela 1, pode-se perceber que o meio do poço está localizado a 1446,438 metros de profundidade. Analisando-se a variável DT, nota-se que esta apresentou uma média de 81,38 com desvio padrão de 15,40.

Observa-se também, que a variável DT apresenta uma assimetria positiva indicando que a distribuição apresenta uma cauda para o lado direito.

4.1.2. Análise das funções não lineares no poço P1

Os dados do poço P1 foram ajustados através dos modelos de regressão não linear, dentre eles: a função exponencial, logarítmica, potência e a polinomial. Para discernir quais delas se adequam melhor aos dados será observado o coeficiente de determinação e o MAPE das mesmas.

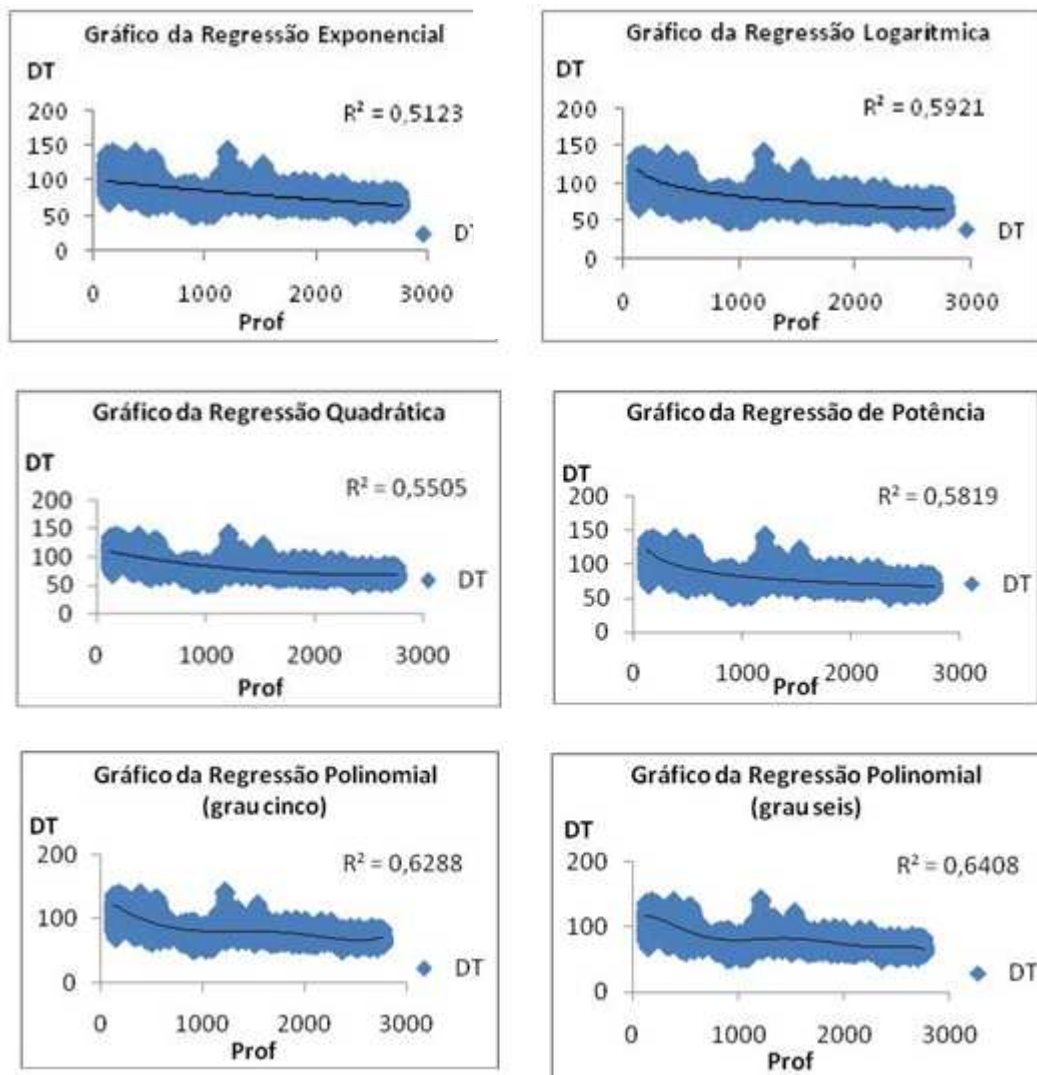


Figura 3- Gráfico representativo das regressões não lineares

Através da Figura 3, obtêm-se os gráficos das regressões não lineares. A Regressão Exponencial apresentou equação $y = 102,02e^{-2,10^{-4}x}$ e coeficiente de determinação igual a 51,23%. No entanto, a Regressão Logarítmica apresentou função $y = -16,51\ln x + 197,76$, com coeficiente de determinação 59,21%. A equação da Regressão Quadrática foi $y = 7,10^{-6} \cdot x^2 - 0,0353 \cdot x + 112,66$ com coeficiente de determinação de 55,05%. A função potência, também denominada função geométrica, obteve equação $y = 301,06x^{-0,188}$ com coeficiente de determinação igual a 58,19%. Já a Regressão Polinomial, de grau cinco e seis, deu-se através da

equação $y = 5.10^{-15}x^5 - 3.10^{-11}x^4 + 3.10^{-8}x^3 + 5.10^{-5}x^2 + 0,1116x + 134,87$ e $y = -2.10^{-17}x^6 + 1.10^{-13}x^5 - 5.10^{-10}x^4 + 8.10^{-7}x^3 - 0,0006x^2 + 0,0995x + 110,86$, sendo seus coeficientes de determinação igual a 62,88% e 64,08%, respectivamente.

Fazendo uma comparação das funções obtidas, pode-se perceber que nenhum dos ajustes apresentarão coeficiente de determinação menor que 50%, o que indica uma percentagem boa, pois elas indicam o quanto a variável profundidade está influenciando na variável DT. Faz-se notório que a regressão polinomial, de grau seis, foi a que mais se adequou aos dados analisados apresentando um $R^2 = 64,08\%$.

As regressões não lineares apresentaram todas um MAPE superior a 10%, dentre as funções analisadas, a regressão exponencial, foi a que apresentou-se menor (mais ainda não adequada), sendo sua percentagem de 29,87%. No entanto, a regressão polinomial de grau seis, que tinha apresentado um R^2 mais atrativo, perde a sua precisão ao ser analisado o seu MAPE que foi de 46,27%.

Para o modelo da regressão polinomial, de grau seis, plotou-se o gráfico dos resíduos versus a profundidade, o qual está representado na Figura abaixo:

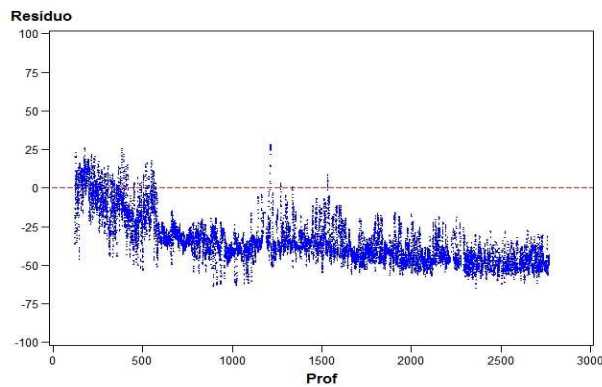


Figura 4 - Gráfico representativo do resíduo versus a profundidade

Pela Figura 4, consegue-se perceber que o modelo não está adequado, como foi pensado na análise do coeficiente de determinação, ao plotar-se o gráfico dos resíduos com profundidade percebe-se que os valores encontram-se afastados da faixa zero, fato que já era previsto devido ao valor do erro médio absoluto percentual.

4.2. ANÁLISE DO POÇO P2

4.2.1. Análise descritiva das variáveis

Para compreender melhor os dados foi construído o gráfico representativo do perfil sônico (DT) gerado no poço P2, conforme Figura 5.

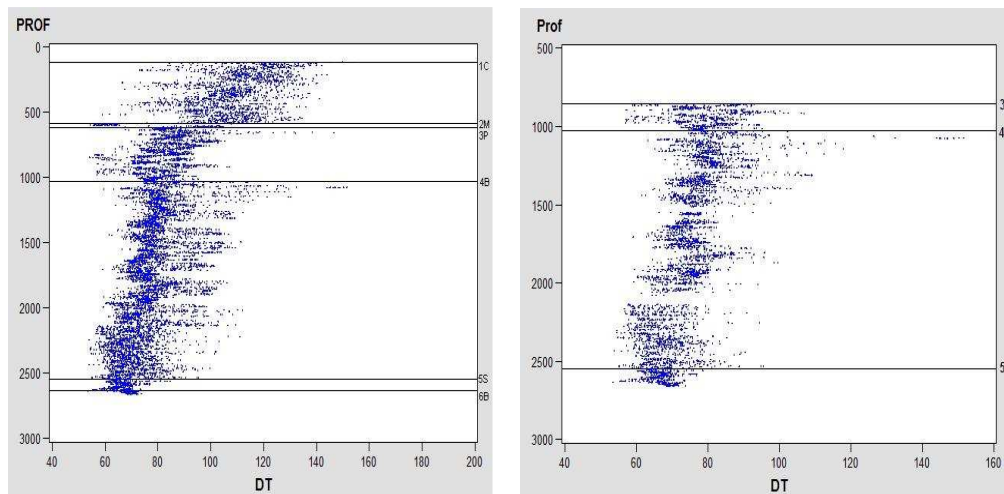


Figura 5 – Gráfico da variável DT versus profundidade

O início do poço P2 em estudo está a 115m e o final está a 2663,75m, mas os dados a serem analisados iniciam na profundidade 858,5m e seguem até 2659m, devido ao não conhecimento da variável DT em certas profundidades do poço.

A Figura 5 mostra o gráfico representativo do perfil sônico (DT) gerado no poço P2 antes e após cortes. Nota-se a existência de uma tendência decrescente nos valores encontrados de DT em direção final do poço.

Os registros, da Tabela 2, das estatísticas pelo método dos momentos, apresentam as seguintes características:

Tabela 2 - Resumo das Estatísticas Descritivas

| Variáveis | Média | Mediana | Variância | Desvio Padrão | CV% | Coef. Assimetria |
|-----------|---------|---------|-----------|---------------|---------|------------------|
| PROF | - | 1686,5 | - | - | - | - |
| DT | 75,0086 | 74,683 | 87,25824 | 9,341212 | 12,4535 | -1,56713 |

Através da mediana da variável Prof, contida na Tabela 2, sabe-se que a metade do poço está situado a 1686,5 metros. A variável DT apresentou média igual a 75 com desvio de 9,34. Observa-se ainda, que esta apresentou uma assimetria negativa, significando que a distribuição apresenta uma cauda para o lado esquerdo.

4.2.2. Análise das funções não lineares no poço P2

Os dados do poço P2 foram ajustados através dos modelos de regressão não linear, dentre eles: a função exponencial, logarítmica, potência e a polinomial. Para discernir quais delas se adequam melhor aos dados será observado o coeficiente de determinação e o MAPE das mesmas.

Pela Figura 6, obtêm-se os gráficos das regressões não lineares. A Regressão Exponencial apresentou equação $92,308e^{-1.10^{-4}x}$ e coeficiente de determinação igual a 35,88%. No entanto, a Regressão Logarítmica apresentou função $y = -15,07\ln x + 186,3$ e coeficiente de determinação igual a 31,02%. A equação da Regressão Quadrática foi $y = -2.10^{-6}.x^2 - 0,003.x + 86,147$ e seu coeficiente de determinação foi igual a 33,11%. A função potência, também denominada função geométrica, obteve equação $y = 323,01x^{-0,199}$ com coeficiente de determinação igual a 33,56%.

Já as Regressões Polinomiais, de grau três, quatro, cinco e seis, deram-se através da equação $y = 1.10^{-8}x^3 + 6.10^{-5}x^2 + 0,0916x + 37,433$, $y = -5.10^{-12}x^4 + 5.10^{-8}x^3 - 0,0002x^2 + 0,1916x - 0,8907$, $y = 3.10^{-14}x^5 - 2.10^{-10}x^4 + 8.10^{-7}x^3 + 0,0014x^2 + 1,2114x - 313,16$ e $y = -4.10^{-17}x^6 + 5.10^{-13}x^5 - 2.10^{-9}x^4 + 5.10^{-6}x^3 - 0,0064x^2 + 4,2947x - 1095$, sendo seus coeficientes de determinação igual a 34,85%, 34,94%, 35,36% e 35,57% respectivamente.

Com base nas funções obtidas, pode-se perceber que nenhum dos ajustes apresentarão coeficiente de determinação maior que 50%, mais o modelo que melhor se adequou aos dados analisado foi a regressão exponencial, apresentando um $R^2 = 35,57\%$.

Analisando-se os MAPE das regressões não lineares, obteve-se que nenhuma delas apresentou um MAPE inferior a 10%. Porém, a que apresentou um percentual menor foi a regressão quadrática, sendo o seu valor 17,59%. A regressão exponencial que obteve um coeficiente de determinação mais elevado apresentou um MAPE superior a da quadrática, com percentual de 24,52%.

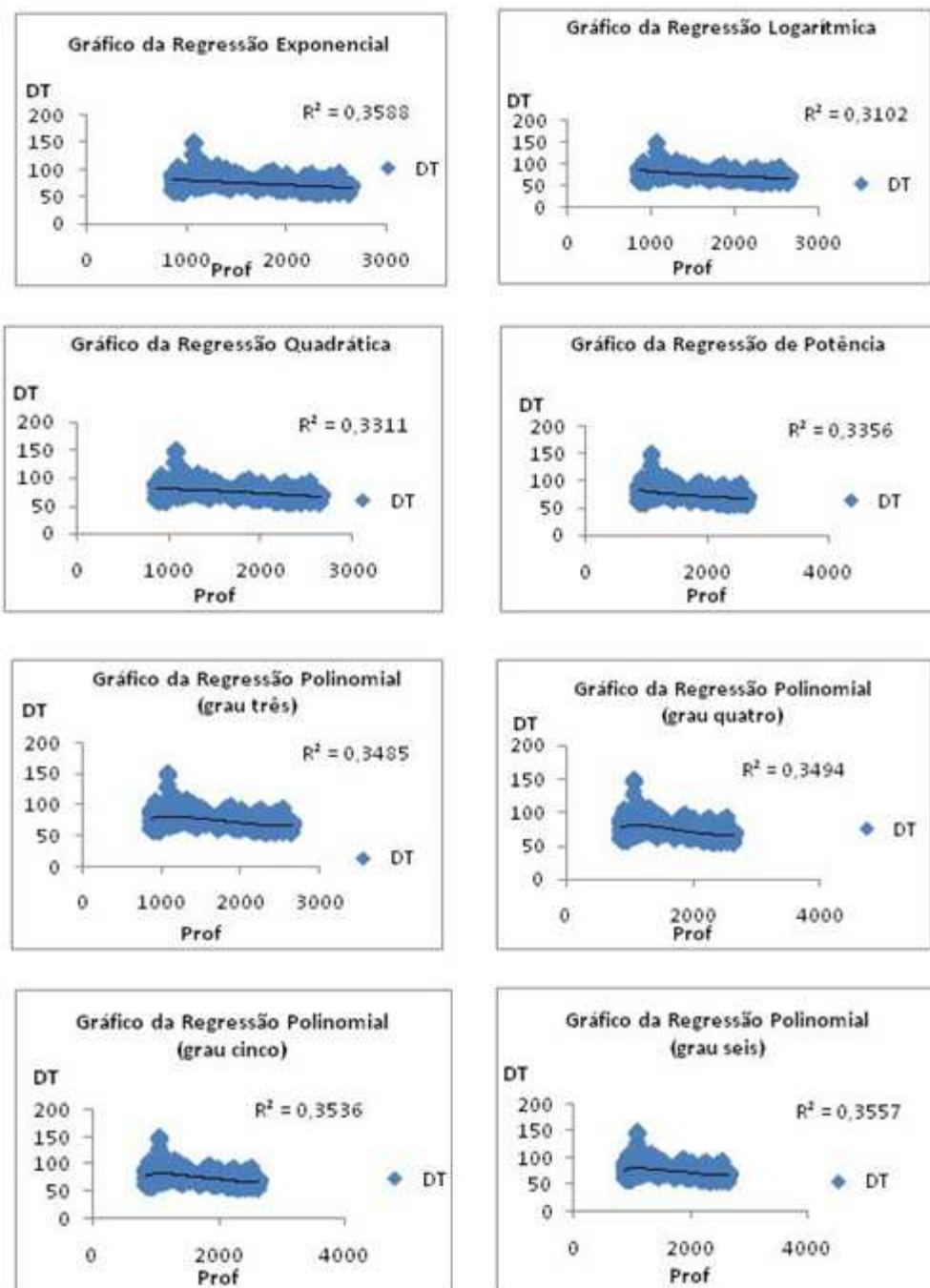


Figura 6 – Gráfico representativo das regressões não lineares

Para a regressão exponencial plotou-se o gráfico do resíduo x DT, o qual está representado na Figura 7.

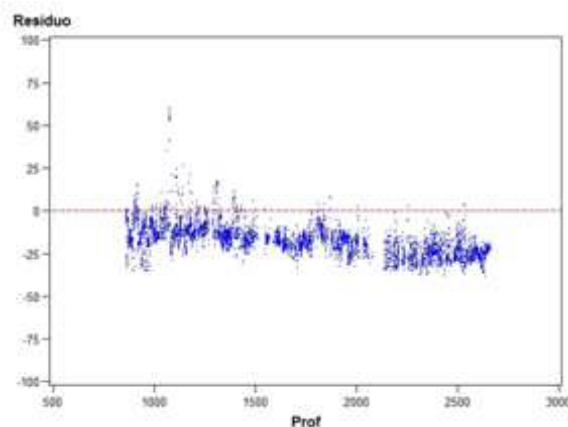


Figura 7 – Gráfico representativo do resíduo versus profundidade

Através da Figura 7, pode-se perceber de forma mais nítida que os dados não se adequaram ao modelo, pois praticamente todos os pontos estão afastados da faixa zero.

4.3. ANÁLISE DE POÇO P3

4.3.1 Análise descritiva das variáveis

Para compreender melhor os dados foi construído o gráfico representativo do perfil sônico (DT) gerado no poço P3, conforme Figura 8.

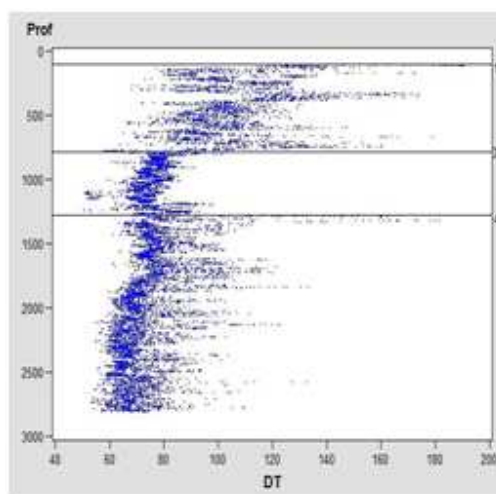


Figura 8 – Gráfico da variável DT versus profundidade

O início do poço P3 em estudo está a 31m e o final está a 2888,75m, mas os dados a serem analisados iniciam na profundidade 103,25m e seguem até 2805m, devido ao não conhecimento de determinados valores referentes a variável DT no poço.

A Figura 8 mostra o gráfico representativo do perfil sônico (DT) gerado no poço P3 antes e após cortes. Nota-se a existência de uma tendência decrescente nos valores encontrados de DT em direção final do poço.

Os registros, da Tabela 3, das estatísticas pelo método dos momentos, apresentam as seguintes características:

Tabela 3 - Resumo das Estatísticas Descritivas

| Variáveis | Média | Mediana | Variância | Desvio Padrão | CV% | Coef. Assimetria |
|-----------|--------|----------|-----------|---------------|----------|------------------|
| PROF | - | 1445,875 | - | - | - | - |
| DT | 83,135 | 77,044 | 383 | 19,5705 | 23,54063 | 1,610101 |

De acordo com a Tabela 3, pode-se perceber que o meio do poço encontra-se a 1445,875 metros. A variável DT apresentou uma média de 83,14 com desvio de 19,57.

Observa-se ainda, que esta apresentou uma assimetria positiva indicando que a distribuição apresenta uma cauda para o lado direito.

4.3.2 Análise das funções não lineares no poço P3

Os dados do poço P3 foram ajustados através dos modelos de regressão não linear, dentre eles: a função exponencial, logarítmica, potência e a polinomial. Para discernir quais delas se adequam melhor aos dados será observado o coeficiente de determinação e o MAPE das mesmas.

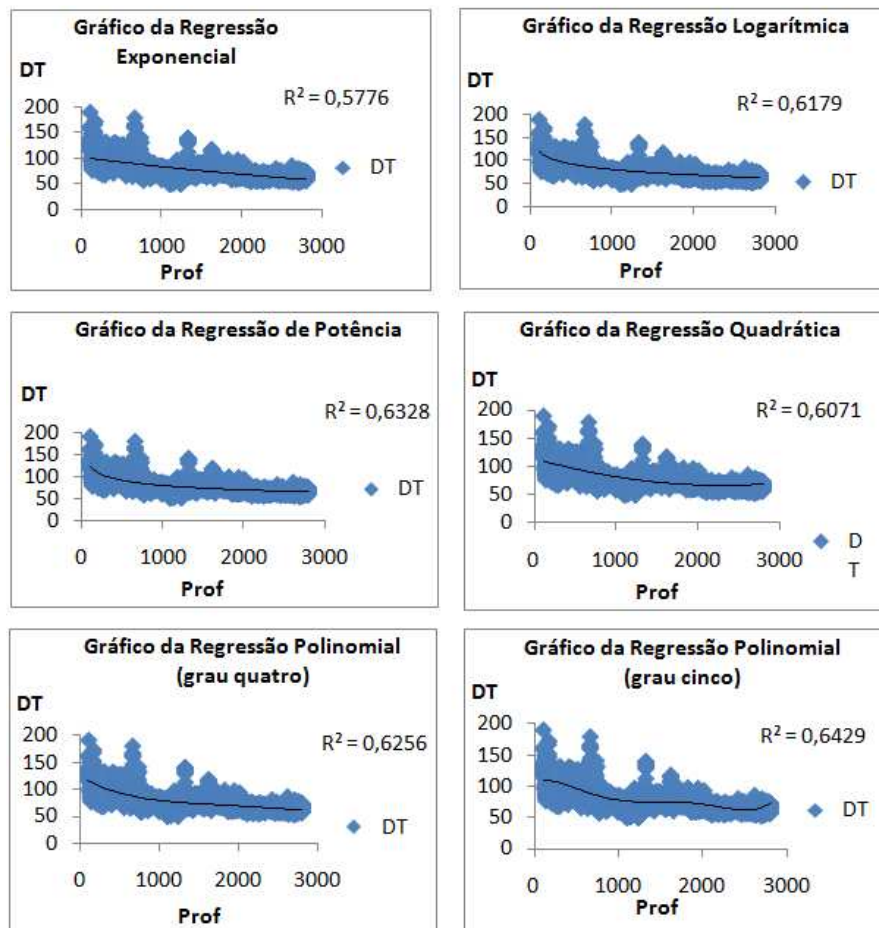


Figura 9 – Gráfico representativo das regressões não lineares

Observa-se pela Figura 9 que a regressão exponencial apresentou equação $y = 101,6e^{-2.10^{-4}x}$ e coeficiente de determinação igual a 57,76%. No entanto, a regressão logarítmica apresentou função $y = -17,28\ln x + 199,94$ e coeficiente de determinação igual a 61,79%. A função potência, também denominada função geométrica, deu-se pela expressão $y = 313,78x^{-0,2}$ com coeficiente de determinação igual a 63,28%. Observando-se o gráfico da regressão quadrática, nota-se que esta apresentou equação $y = 9.10^{-6}.x^2 - 0,0412.x + 113,66$ e coeficiente de determinação igual a 60,71%.

A regressão polinomial, de grau quatro e grau cinco, apresentou equação igual a $y = 2.10^{-12}.x^4 - 2.10^{-8}.x^3 + 6.10^{-5}.x^2 - 0,0855x + 124,11$ e $y = 1.10^{-14}.x^5 - 9.10^{-11}.x^4 + 2.10^{-7}.x^3 - 0,0002x^2 + 0,0398x + 107,43$, sendo os seus coeficientes de determinação 62,56% e 64,29%, respectivamente.

Comparando-se as funções obtidas, pode-se perceber que nenhum dos ajustes apresentarão coeficiente de determinação menor que 50%, o que indica uma percentagem boa, pois elas indicam o quanto a variável profundidade está influenciando na variável DT. Faz-se notório que a regressão polinomial, de grau cinco, foi a que mais se adequou aos dados analisados apresentando um $R^2 = 64,29\%$.

O erro médio absoluto percentual das regressões não lineares apresentaram porcentagens acima de 10%. Das regressões estudadas, a regressão exponencial foi a que apresentou um menor MAPE, sendo o seu percentual de 32,45%. No entanto, a regressão polinomial, de grau cinco, apresentou um valor de 39,49%.

Para a regressão polinomial, de grau cinco, plotou-se os resíduos com relação a profundidade.

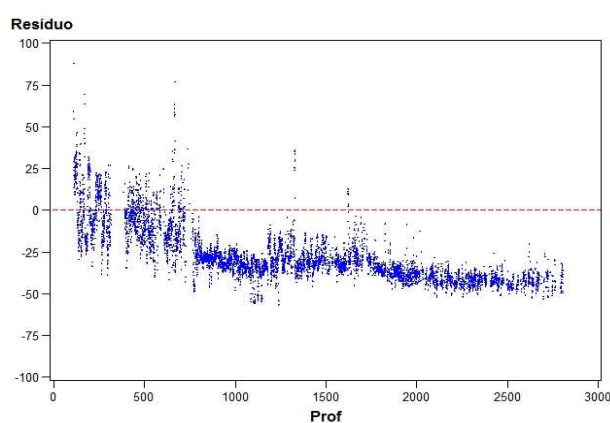


Figura 10 – Gráfico representativo dos resíduos versus a profundidade

Através da Figura 10, fica evidente que os dados não se adequaram ao ajuste polinomial, pois grande parte destes encontra-se afastado da média zero.

4.4. ANÁLISE DO POÇO P4

4.4.1. Análise descritiva das variáveis

Para compreender melhor os dados foi construído o gráfico representativo do perfil sônico (DT) gerado no poço P4, conforme Figura 11.

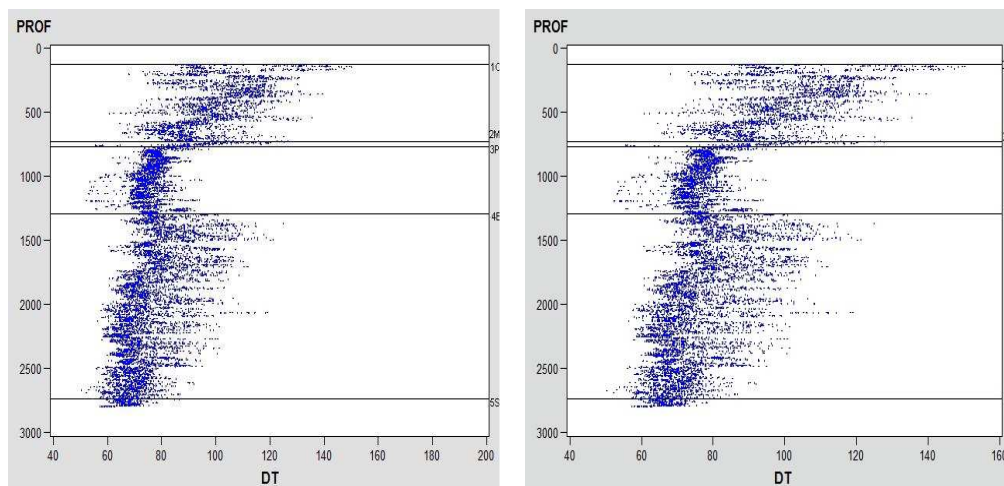


Figura 11 – Gráfico da variável DT versus profundidade

O início do poço P4, em estudo, está a 124m e o final está a 2797,75m, mas os dados a serem analisados iniciam na profundidade 125m e seguem até 2796m, devido a alguns cortes realizados no poço referentes ao não conhecimento da variável DT em determinadas profundidades do poço.

A Figura 11 mostra o gráfico representativo do perfil sônico (DT) gerado no poço P4 antes e após cortes. Nota-se a existência de uma tendência decrescente nos valores encontrados de DT em direção final do poço.

Os registros contidos na Tabela 4, das estatísticas pelo método dos momentos, apresentam as seguintes características:

Tabela 4 - Resumo das Estatísticas Descritivas

| Variáveis | Média | Mediana | Variância | Desvio Padrão | CV% | Coef. Assimetria |
|-----------|--------|---------|-----------|---------------|-------|------------------|
| PROF | - | 1460,50 | - | - | - | - |
| DT | 81,754 | 77,9392 | 222,75 | 14,92 | 18,25 | 0,94254 |

Com base na Tabela 4, pode-se perceber que o meio do poço P4 está localizado a 1460,50 metros de profundidade. Analisando-se a variável DT, nota-se que esta apresentou uma média de 81,75 com desvio padrão de 14,92.

Observa-se também, que a variável DT apresenta uma assimetria positiva indicando que a distribuição apresenta uma cauda para o lado direito.

4.4.2 Análise das funções não lineares no poço P4

Os dados do poço P4 foram ajustados através dos modelos de regressão não linear, dentre eles: a função exponencial, logarítmica, potência e a polinomial. Para discernir quais delas se adequam melhor aos dados será observado o coeficiente de determinação e o MAPE das mesmas.

Através da Figura 12, obtêm-se os gráficos das regressões não lineares. A Regressão Exponencial apresentou equação $y = 99,303e^{-1.10^{-4}x}$ e coeficiente de determinação igual a 41,49%. No entanto, a Regressão Logarítmica apresentou função $y = -14,12\ln x + 181,71$, com coeficiente de determinação 47,15%. A equação da Regressão Quadrática foi $y = 6.10^{-6}.x^2 - 0,0293.x + 108,66$ com coeficiente de determinação de 44,55%. A função potência, também denominada função geométrica, obteve equação $y = 252,24x^{-0,161}$ com coeficiente de determinação igual a 46,35%. Já a Regressão Polinomial, de grau três, quatro, cinco e seis, deu-se através da equação $y = -1.10^{-8}x^3 + 5.10^{-5}x^2 - 0,0801x + 123,45$, $y = 3.10^{-12}x^4 - 3.10^{-8}x^3 + 8.10^{-5}x^2 - 0,1037x + 128,05$, $y = 1.10^{-14}x^5 - 9.10^{-11}x^4 + 2.10^{-7}x^3 - 0,0002x^2 + 0,0402x + 107,09$ e $y = -2.10^{-17}x^6 + 2.10^{-13}x^5 - 7.10^{-10}x^4 + 1.10^{-6}x^3 - 0,0001x^2 + 03174x + 74,915$, sendo seus coeficientes de determinação iguais a 49,84%, 50,07%, 52,17% e 54,33%, respectivamente.

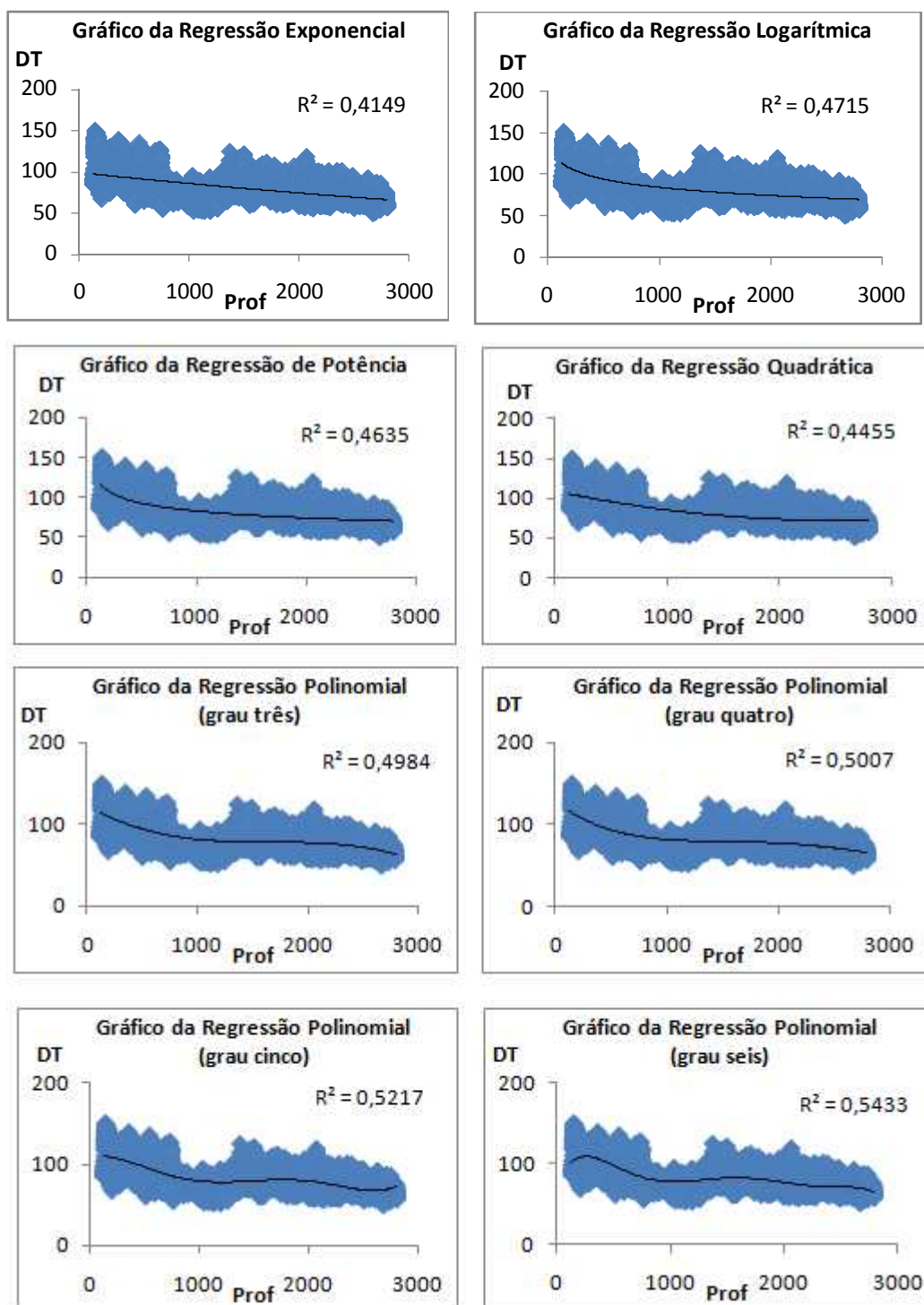


Figura 12 – Gráfico representativo das regressões não lineares

Fazendo uma comparação das funções obtidas, pode-se perceber que a regressão polinomial, de grau seis, foi a que mais se adequou aos dados analisados apresentando um $R^2 = 54,33\%$.

As regressões não lineares apresentaram todas um MAPE superior a 10%, dentre as funções analisadas, a regressão exponencial, foi a que apresentou-se menor (mais ainda não adequada), sendo sua porcentagem de 27,03%. No entanto, a regressão polinomial de grau seis, que tinha apresentado um R^2 mais atrativo, perde a sua precisão ao ser analisado o seu MAPE que foi de 34,95%.

Para o modelo da regressão polinomial, de grau seis, plotou-se o gráfico dos resíduos versus a profundidade, o qual, está representado na Figura abaixo:

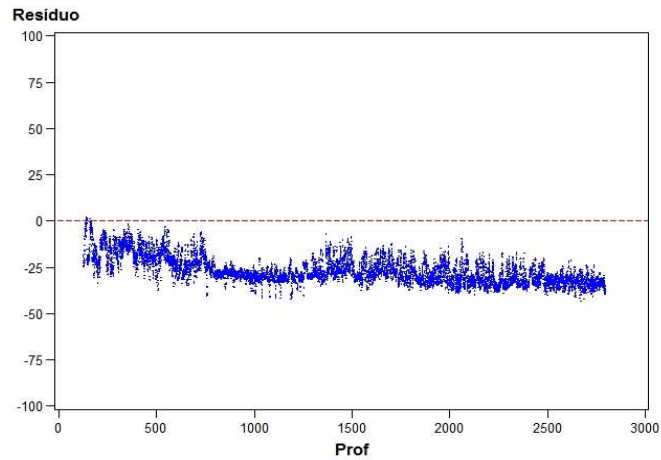


Figura 13 - Gráfico representativo do resíduo versus a profundidade

Pela Figura 13, consegue-se perceber que o modelo não está adequado, pois os valores encontram-se afastados da faixa zero, fato que já era previsto devido ao valor do erro médio absoluto percentual.

4.5. ANÁLISE DO POÇO P5

4.5.1 Análise descritiva das variáveis

Para compreender melhor os dados foi construído o gráfico representativo do perfil sônico (DT) gerado no poço P5, conforme Figura 14.

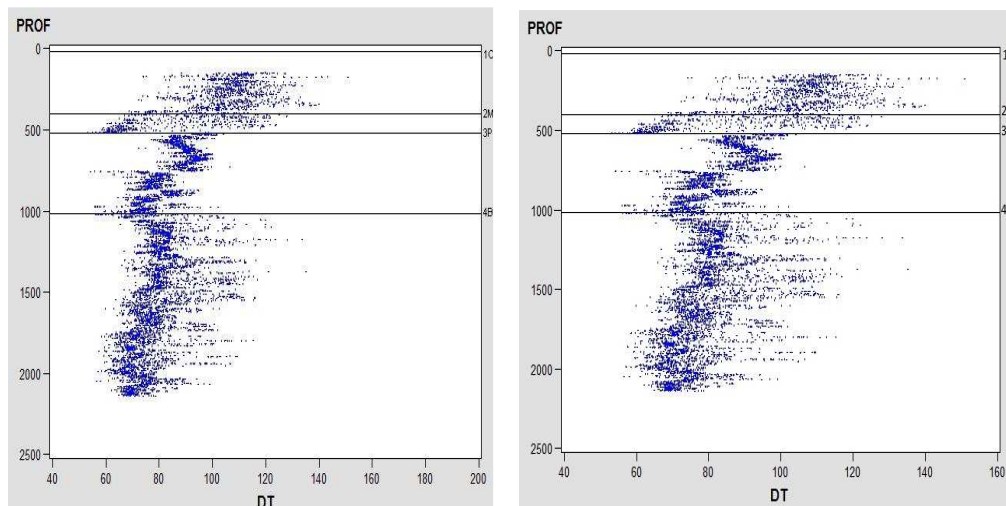


Figura 14 – Gráfico da variável DT versus profundidade

O início do poço P5, em estudo, está a 18m e o final está a 2146,75m, mas os dados a serem analisados iniciam-se a 147m e seguem até 2139m, devido a alguns cortes realizados no poço referentes ao não conhecimento da variável DT em determinadas profundidades do poço.

A Figura 14 mostra o gráfico representativo do perfil sônico (DT) gerado no poço P5 antes e após cortes. Nota-se a existência de uma tendência decrescente nos valores encontrados de DT em direção final do poço.

Os registros contidos na Tabela 5, das estatísticas pelo método dos momentos, apresentam as seguintes características:

Tabela 5 - Resumo das Estatísticas Descritivas

| Variáveis | Média | Mediana | Variância | Desvio Padrão | CV% | Coef. Assimetria |
|-----------|---------|---------|-----------|---------------|---------|------------------|
| PROF | - | 1148,38 | - | - | - | - |
| DT | 84,3061 | 81,2295 | 196,90 | 14,033 | 16,6446 | 1,08895 |

Através da mediana da variável Prof, contida na Tabela 2, sabe-se que a metade do poço está situado a 1148,38 metros. A variável DT apresentou média igual a 84,31 com desvio de 14,03. Observa-se ainda, que esta apresentou uma assimetria negativa, significando que a distribuição apresenta uma cauda para o lado esquerdo.

4.5.2 Análise das funções não lineares no poço P5

Os dados do poço P5 foram ajustados através dos modelos de regressão não linear, dentre eles: a função exponencial, logarítmica, potência e a polinomial. Para discernir quais delas se adequam melhor aos dados será observado o coeficiente de determinação e o MAPE das mesmas.

Através da Figura 15, obtêm-se os gráficos das regressões não lineares. A Regressão Exponencial apresentou equação $99,114e^{-2.10^{-4}x}$ e coeficiente de determinação igual a 30,57%. No entanto, a Regressão Logarítmica apresentou função $y = -13,12\ln x + 174,39$ e coeficiente de determinação igual a 37,99%. A equação da Regressão Quadrática foi $y = 9.10^{-6}.x^2 - 0,0348.x + 108,84$ e seu coeficiente de determinação foi igual a 34,84%. A função potência, também denominada função geométrica, obteve equação $y = 225,67x^{-0,145}$ com coeficiente de determinação igual a 36,07%.

Já as Regressões Polinomiais, de grau três, quatro, cinco e seis, deram-se através da equação $y = -3.10^{-8}x^3 + 0,0001x^2 - 0,1233x + 130,5$, $y = 1.10^{-11}x^4 - 9.10^{-8}x^3 - 0,0002x^2 + 0,1789x + 139,87$, $y = 4.10^{-14}x^5 - 2.10^{-10}x^4 + 4.10^{-7}x^3 + 0,0003x^2 + 0,0181x + 114,51$ e $y = -1.10^{-17}x^6 + 1.10^{-13}x^5 - 4.10^{-10}x^4 + 7.10^{-7}x^3 - 0,0005x^2 + 0,0709x + 109,01$ sendo seus coeficientes de determinação igual a 42,92%, 43,47%, 44,88% e 44,90% respectivamente.

Com base nas funções obtidas, pode-se perceber que nenhum dos ajustes apresentarão coeficiente de determinação maior que 50%, mais o modelo que melhor se adequou aos dados analisado foi a regressão polinomial de grau seis, apresentando um $R^2 = 44,90\%$.

Analisando-se os MAPE das regressões não lineares, obteve-se que nenhuma delas apresentou um MAPE inferior a 10%. Porém, a que apresentou um percentual menor foi a regressão exponencial, sendo o seu valor 22,14%. A regressão polinomial de grau seis, que obteve um coeficiente de determinação mais elevado apresentou um MAPE superior a da exponencial, com percentual de 36,60%.

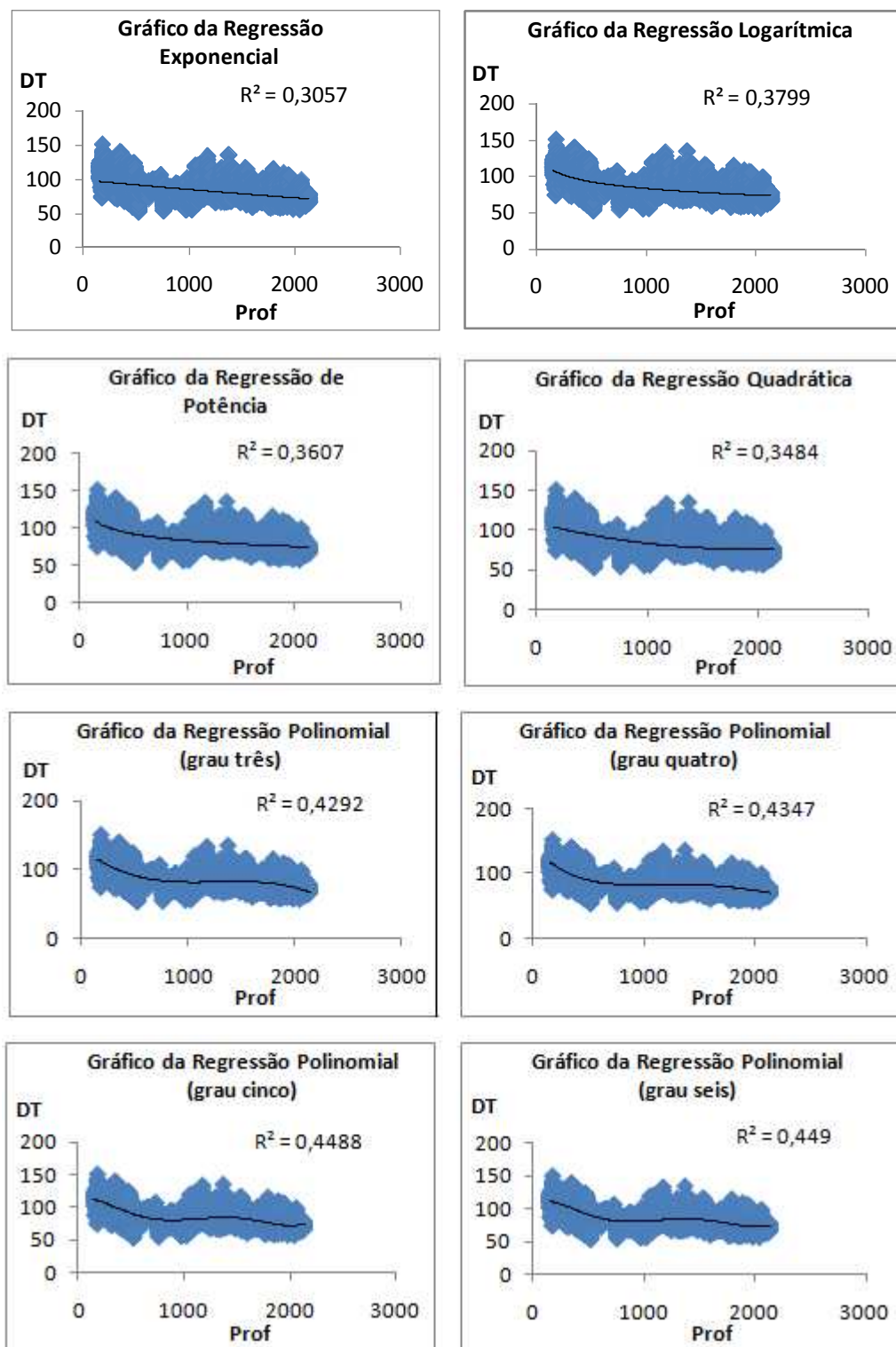


Figura 15 – Gráfico representativo das regressões não lineares

Para a regressão polinomial de grau seis, plotou-se o gráfico do resíduo x DT, o qual está representado na Figura 16.

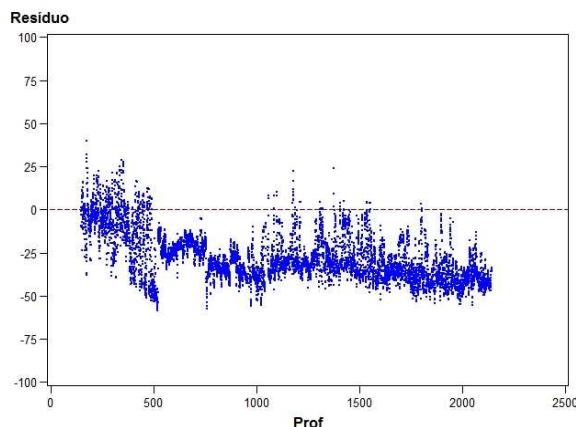


Figura 16 – Gráfico representativo do resíduo versus profundidade

Através da Figura 16, pode-se perceber de forma mais nítida que os dados não se adequaram ao modelo, pois praticamente todos os pontos estão afastados da faixa zero.

5. CONCLUSÕES

Com a utilização do petróleo em diversos seguimentos da indústria, torna-se necessário a constante busca por técnicas mais eficientes e acessíveis.

Visando-se encontrar um modelo que pudesse fazer estimativas do perfil sônico nos poços de petróleo, testou-se neste trabalho os modelos básicos da regressão não linear. Com base nas análises efetuadas, fica evidente que este modelo não se adequou aos poços de petróleo, sendo necessária a procura de outros métodos. Uma sugestão para um trabalho futuro é a aplicação de uma análise de intervenção.

-
1. LIMA, K. T. P. De. Utilização de Métodos Sísmicos, Perfilagem e Testemunho de Poços para Caracterização dos Turbiditos da Formação Urucutuca na Bacia de Almada (BA). UENF, Macaé-RJ. 2005
 2. RUSSO, S. L.; SIMON, V. H. CAMARGO. M. E. Medida corretiva na presença de correlação serial em observações de perfilagem. XVSIMPEP. Bauru. 2008
 3. OLIVEIRA, L. J. Avaliação do Uso da Perfilagem Geofísica para a Obtenção de Informações Secundárias para Utilização em Co-estimativas de Variáveis Geólogo-mineiras. Porto Alegre: Dissertação apresentada no programa de pós-graduação em Engenharia na UFRGS. 2005
 4. SANTOS, D. M. N. E. Análises de Regressão para Estimativas de Tempos de Trânsito Sintéticos. Monografia de graduação. São Cristóvão. 2005.
 5. THOMAS, J. E. Fundamentos e Engenharia de Petróleo. PETROBRAS. Rio de Janeiro: Ed. Interciência, 2001.
 6. WYLLIE, M. R. J., GREGORY, A. R. & GARDNER, L. W. Elastic Wave Velocities in Heterogeneous and Porous Media. Geophysics, Vol. 21.1956
 7. RAGSDALE, C. T. Spreadsheet Modeling and Decision Analysis. 3 ed, South-Western College Publishing, Cincinnati, Ohio, 2001.
 8. OLIVEIRA, M. M. D. Modelos de Regressão Não-Lineares. Disponível em: www.fep.up.pt/disciplinas/2E103/nlin.pdf. Visitado em 13 de janeiro de 2010.
 9. MILONE, G.; ANGELINI, F. Estatística aplicada. São Paulo: Atlas, 1995.
 10. LAPPONI, J. C. Estatística usando Excel. 4 ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2005.
 11. DEVORE, L. J. Probabilidade e Estatística para Engenharia e Ciências. 6 ed. São Paulo: Pioneira Thomson Learning, 2006.
 12. GUJARATI, D. N. Econometria básica. 3. ed. São Paulo: Makron Books, 2000.
 13. BUSSAB, W. D. O, MORETTIN, P. A. Estatística básica. 5 ed. São Paulo: Saraiva, 2002.

14. LEVINE, D. M.; BERENSON, M. L.; STEPHAN, D. Estatística; Teoria e Aplicações. Rio de Janeiro, LTC, 2000.