



Modelagem de Poços de Petróleo para Previsão
dos Gradientes de Pressão de *Surge* e *Swab*
Durante Operações de Manobra

Isadora Adler Sidi

Monografia em Engenharia Química

Orientadores

Prof. Luiz Fernando Lopes Rodrigues Silva, D.Sc.

Prof. Mauricio Bezerra de Souza Jr, .D.Sc.

Dezembro de 2011

MODELAGEM DE POÇOS DE PETRÓLEO PARA PREVISÃO
DOS GRADIENTES DE PRESSÃO DE *SURGE* E *SWAB*
DURANTE OPERAÇÕES DE MANOBRA

Isadora Adler Sidi

Monografia em Engenharia Química submetida ao Corpo Docente da Escola de Química, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Engenharia Química.

Aprovado por:

Carlos André Vaz Junior, D.Sc.

Roni Abensur Gandelman, Eng.

Simone de Carvalho Miyoshi, M.Sc.

Orientado por:

Luiz Fernando Lopes Rodrigues Silva, D.Sc.

Mauricio Bezerra de Souza Jr, D.Sc.

Rio de Janeiro, RJ-Brasil
Dezembro de 2011

Sidi, Isadora A.

Modelagem de poços de petróleo para previsão dos gradientes de pressão de *surge* e *swab* durante operações de manobra / Isadora Adler Sidi. Rio de Janeiro: UFRJ/EQ, 2011.

vii, 58 p.;il.

(Monografia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química, 2011.

Orientadores: Luiz Fernando Lopes Rodrigues Silva e Mauricio Bezerra de Souza Jr.

1. Modelagem de surge e swab. 2. Perfuração. 3. Rede Neuronal. 4. Monografia. (Graduação – UFRJ/EQ). 5. Luiz Fernando Lopes Rodrigues Silva e Mauricio Bezerra de Souza Jr. I. Título.

A minha avó, pelas palavras de amor e aos meus pais e irmãs, pela compreensão e força,
mesmo que distantes.

“Nos momentos de dificuldade de minha vida, lembrei-me que na história da humanidade o amor e a verdade sempre venceram.”

Mahatma Gandhi

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha avó, que esteve presente durante toda a minha formação acadêmica, dando-me apoio, suporte e força para jamais desistir.

Agradeço a meus pais, que acreditaram em mim e no que eu poderia me tornar, fornecendo-me a liberdade e a responsabilidade nos anos mais difíceis de minha vida.

Agradeço a minhas irmãs, pelos abraços e pela cumplicidade quando mais precisei.

Agradeço a minhas amigas e aos meus amigos, que me aconselharam a seguir em frente mesmo que pedras estivessem atravessadas em meu caminho.

Agradeço também ao André Leibsohn, Mauricio Folsta e Alex Waldeman pelos ensinamentos no meu período de estágio no CENPES.

Agradeço a meus orientadores Luiz Fernando Lopes Rodrigues e Mauricio Bezerra de Souza Jr. pela ajuda durante o percurso de construção da monografia.

Resumo da Monografia apresentada à Escola de Química como parte dos requisitos para a obtenção do grau de Engenheiro Químico.

MODELAGEM DE POÇOS DE PETRÓLEO PARA PREVISÃO DO GRADIENTE DE PRESSÃO DE *SURGE* E *SWAB* DURANTE OPERAÇÕES DE MANOBRA

Isadora Adler Sidi

Dezembro, 2011

Orientadores: Prof. Luiz Fernando Lopes Rodrigues Silva, D.Sc.
Prof. Mauricio Bezerra de Souza Jr, D.Sc.

A perfuração de um poço de petróleo é um processo complexo que exige um conjunto de equipamentos, cada qual responsável por uma função específica. Para que a operação seja eficiente e não cause danos físicos, econômicos e operacionais, é indispensável o controle dos gradientes de pressão de fundo do poço.

As manobras são entendidas como deslocamentos da coluna de perfuração e podem ser necessárias para a troca de uma broca desgastada ou para a retirada de um componente de um equipamento de dentro do poço. Durante a descida da coluna, pode ocorrer um aumento da pressão no interior do poço, conhecido como pressão de *surge*, que pode levar a fraturas de formação e perdas de circulação. Durante a subida da coluna, pode ser verificada uma diminuição da pressão no interior do poço, chamada de pressão de *swab*, que pode causar *kicks* de pressão. O *kick* é uma invasão do fluido de formação ou influxo de gás para dentro do poço e, quando não controlado, pode originar os fluxos denominados de *blowouts*.

A modelagem da manobra é um desafio, uma vez que cada poço de petróleo apresenta características bem específicas, como profundidade, composição do solo e das rochas, além da arquitetura e da inclinação das fases de perfuração. Assim, para cada modelo aplicado ao poço, são necessárias especificações e considerações bem definidas.

Na literatura, são encontrados diversos modelos que têm como objetivo modelar a previsão dos gradientes de pressão de *surge* e *swab* durante as manobras. Dados de dois poços da PETROBRAS foram disponibilizados para a validação dos modelos. Foram feitas comparações entre os valores experimentais e os valores modelados de gradientes de pressão de fundo empregando modelos da literatura. Além desta análise, construiu-se um treinamento de redes neurais para a modelagem dos dois poços.

Os modelos estudados consideram o regime estacionário e o escoamento incompressível e laminar. São aplicados a eles fluidos que seguem o modelo da Lei da Potência. Os trabalhos de Bourgoyne et al, Wang & Chukwu e de Almeida et al. apresentaram resultados satisfatórios para a modelagem dos dois poços. O modelo do fator de atrito não se aplicou aos poços. O treinamento das redes neurais para a modelagem dos gradientes de pressão de fundo também pode ser considerada uma solução válida.

ÍNDICE

CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO	1
I.1 Objetivo	2
I.2 Organização do texto	2
I.2 Perfuração de um poço de petróleo	3
CAPÍTULO II – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
CAPÍTULO III – MODELAGEM	11
III.1 Modelos estudados	11
III.2 Modelagem por redes neuronais	14
III.3 Descrição dos testes	17
III.3.1 Poço-escola localizado em Taquipe, Bahia	17
III.3.2 Poço-escola localizado na Bacia de Santos	21
CAPÍTULO IV – RESULTADOS	23
IV.1 Poço-escola localizado em Taquipe, Bahia	23
IV.2 Poço-escola localizado na Bacia de Santos	31
IV.3 Filtragem dos dados	40
IV.4 Aplicação de Redes Neuronais	31
CAPÍTULO V – CONCLUSÃO	49
CAPÍTULO VI – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	52

1. Introdução

A perfuração de um poço de petróleo é um processo complexo que pode exigir a presença de uma sonda rotativa, formada por um conjunto de equipamentos, cada qual responsável por uma função específica. Para que a operação seja eficiente e não provoque danos físicos, econômicos e operacionais, é indispensável o controle dos gradientes de pressão de fundo do poço.

A pressão de fundo é conhecida como a pressão que o fluido exerce no interior do poço e é calculada como a soma das pressões hidráulica e hidrostática.

Durante a perfuração, podem ser necessárias as manobras, operações entendidas como deslocamentos da coluna de perfuração que são realizadas para a troca de uma broca desgastada ou para a retirada de um componente de um equipamento de dentro do poço, por exemplo. Durante a descida da coluna, pode ser observado um aumento da pressão no interior do poço, conhecido como pressão de *surge*, que pode levar a fraturas de formação e perdas de circulação. Durante a subida da coluna, pode ser verificada uma diminuição da pressão no interior do poço, chamada de pressão de *swab*, que pode causar *kicks* de pressão. O *kick* é uma invasão do fluido de formação ou influxo de gás para dentro do poço e, quando não controlado, pode originar os *blowouts*.

Para que os riscos nestas movimentações da coluna sejam minimizados, devem ser previstos os gradientes de pressão de *surge* e *swab*. Diversos trabalhos na literatura buscaram modelar os poços e estudar teórica e experimentalmente os fatores capazes de afetar estas variações de pressão de fundo do poço. Entre os mais importantes, estão a geometria do sistema poço-coluna, a coluna de perfuração, as propriedades do fluido de perfuração e a velocidade e a aceleração finais da coluna de perfuração.

1.1. Objetivo do trabalho

O objetivo deste trabalho é fazer um estudo comparativo dos resultados de quatro modelos encontrados na literatura e de um modelo baseado em redes neuronais para a previsão dos gradientes de pressão de *surge* e *swab* durante a operação de manobra de dois poços de petróleo, com os valores experimentais disponíveis.

O primeiro, um poço-escola, localizado em Taquipe, na Bahia, é de fundamental importância para a verificação do melhor modelo estudado. A partir desta análise, poderão ser realizados cálculos mais detalhados e com uma quantidade superior de dados disponíveis de um poço localizado na Bacia de Santos.

1.2. Organização do trabalho

O trabalho foi organizado em 7 capítulos, sendo iniciado com o **capítulo I** que contextualiza o estudo com seu objetivo e organização do texto, e insere o tema da perfuração de um poço de petróleo.

O **capítulo II** faz uma revisão bibliográfica dos diversos modelos estacionários e dinâmicos para a previsão dos gradientes de *surge* e *swab* durante a operação de manobra.

O **capítulo III** aborda os quatro modelos estudados no trabalho e enfatiza os autores, fórmulas para o cálculo dos gradientes de pressão de *surge* e *swab* e suas considerações e limitações. Ainda neste capítulo, é mostrado como se dá o treinamento de redes neuronais e é feita uma descrição dos testes realizados nos dois poços de petróleo.

O **capítulo IV** compara os resultados do cálculo dos gradientes de pressão de *surge* e *swab* gerados pelos quatro modelos estudados através de gráficos com os valores experimentais disponíveis. É realizada uma análise da influência de ruídos nos resultados através da filtragem de dados. Este capítulo também apresenta a modelagem dos poços com um treinamento de redes neuronais para a previsão dos gradientes de pressão de fundo.

As conclusões e sugestões para trabalhos futuros são comentados no **capítulo V**.

1.3. Perfuração de um poço de petróleo

A perfuração de um poço de petróleo pode ser realizada através do emprego de uma sonda rotativa, que é constituída por sistemas responsáveis por diferentes funções. A coluna de perfuração é formada por comandos, tubos pesados e tubos de perfuração. As rochas são perfuradas através da rotação e de peso aplicados à broca localizada na extremidade da coluna. Um fluido de perfuração ou lama é introduzido dentro da coluna, e retorna à superfície através do espaço anular entre as paredes do poço e da coluna removendo os fragmentos da rocha. Após alcançar uma profundidade específica, retira-se a coluna do interior do poço e, desce-se a coluna de revestimento com diâmetro inferior ao da broca. A fim de isolar as rochas atravessadas para que se avance com segurança a perfuração, o anular entre os tubos de revestimento e as paredes do poço é cimentado. Terminada esta etapa, prossegue-se com a perfuração e, no poço, é descida uma coluna de perfuração com diâmetro menor do que a de revestimento. Nota-se, portanto, através desta breve descrição, que a operação envolve diversas fases de perfuração, cada qual caracterizada por diferentes diâmetros das brocas. (Thomas, 2001)

A Figura 1 apresenta um sistema bloco-catarina em que se observam diversos equipamentos necessários para a perfuração de um poço de petróleo.

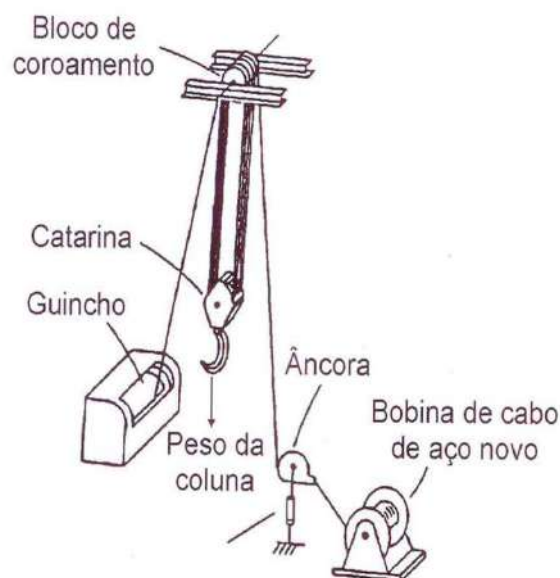


Figura 1.1. Sistema bloco-catarina (Thomas, 2001)

A Catarina é responsável pela sustentação direta dos tubos que descem no poço, permitindo o movimento para cima e para baixo no mastro. A mesa rotativa tem a função de gerar movimento rotativo à coluna de perfuração. Em sondas convencionais, quando realizada a perfuração por rotação, verifica-se a presença de um *kelly*, um tubo localizado no topo da coluna, que recebe rotação da mesa rotativa e a transmite à broca. As sondas modernas contam com um *top-drive*, um motor capaz de gerar a rotação e transferi-la diretamente à parte superior da coluna de perfuração. Assim, os tubos de perfuração podem ser utilizados abaixo do motor, dispensando a presença da mesa rotativa e do *kelly*.

Na perfuração, é necessário o controle da pressão no fundo do poço, ou seja, a pressão exercida pelo fluido no fundo do poço, que é entendida como a soma das pressões hidrostática e hidráulica. O valor da pressão no fundo do poço é limitado por um intervalo entre o valor mínimo do gradiente de pressão de poros e o valor máximo do gradiente de pressão de fratura. A pressão de poros é definida como a pressão exercida pelos fluidos na parede dos poros da formação, sendo medida por um teste de formação, pela descida de amostradores ou estimada com bases em informações de tempo de trânsito. Já a pressão de fratura pode ser conhecida como o limite de pressão a partir do qual é verificada uma falha na rocha por tração.

Em um poço exploratório, os valores limites de pressão de fratura e de poros são obtidos através de um estudo geológico do campo de petróleo. É aplicado um método de prospecção denominado de método sísmico, no qual são geradas ondas elásticas que se propagam pelo interior da Terra. Estas ondas são refletidas e refratadas nas interfaces que dividem rochas de diferentes formações petrofísicas e voltam à superfície, sendo assim captadas por modernos equipamentos registradores.

A velocidade de propagação das ondas sísmicas depende da densidade e das constantes elásticas do meio. Sabendo que a velocidade de onda e a profundidade do poço induzem a diferentes densidades de formação, geólogos utilizam correlações já existentes na literatura para estimar os valores máximos e mínimos dos gradientes de pressões de fratura e de poros, respectivamente. (Thomas, 2001)

Durante a perfuração, podem ser realizadas as manobras, que são entendidas como operações de movimentação na coluna. Esses deslocamentos da coluna podem ocorrer devido à necessidade de se trocar uma broca de perfuração ou resgatar algum componente que desconectou da coluna e se encontra dentro do poço. As manobras podem gerar alterações nas pressões no interior do poço. A pressão de *surge* ocorre durante a descida da coluna e, este aumento da pressão no interior do poço pode levar a fraturas de formação e perdas de circulação. Durante a subida da coluna, ocorre uma diminuição da pressão no interior do poço, chamada de pressão de *swab*, que pode causar *kicks* de pressão. O *kick* é uma invasão do fluido de formação ou influxo de gás para dentro do poço e, quando não controlado, pode dar origem aos *blowouts*.

2. Revisão Bibliográfica

Na literatura são encontrados diversos modelos teóricos e experimentais para previsão da pressão no interior do poço durante as manobras. Os principais parâmetros que influenciam esta grandeza são as propriedades do fluido, a coluna de perfuração, a geometria do sistema poço-coluna, a aceleração e a velocidade final de movimentação da coluna.

Estes modelos, divididos em regimes estacionários ou dinâmicos, baseiam-se na equação da conservação da quantidade de movimento e em equações constitutivas de fluidos de perfuração como os de *Bingham* e Lei de Potência. Entre os modelos estáticos são conhecidos os de Fontenot e Clark (1974), Bourgoyne et al. (1981), Bing et al (1995) e Yang e Chukwu (1995). Já os modelos de Wang e Chukwu (1996), Bing e Kaigi (1996), Lal (1983) e Mitchell (1988) são exemplos de dinâmicos.

Admite-se que Cannon, em 1934, foi o primeiro estudioso a sugerir que as variações das pressões de *surge* eram causadas pela movimentação da coluna de perfuração e que esta grandeza era diretamente proporcional à profundidade do poço.

Burkhardt (1961) foi o precursor no estudo para previsão de pressões de *surge* e *swab* utilizando um óleo de campo. O modelo, entretanto, não considerou efeitos de inércia do fluido e compressibilidade, elasticidade da parede do poço nem a elasticidade axial da coluna. O trabalho também não considerou a perda de carga no estado estacionário no anular para pressões de *surge*.

Fontenot e Clark (1974) desenvolveram um método baseado nas considerações do fator de atrito para cálculo de pressões de *surge* e *swab*, em regime estacionário, para dois modelos diferentes de fluidos: *Bingham* e Lei de Potência. O modelo possibilitou a avaliação da variação das propriedades dos fluidos de perfuração com a profundidade do poço e mostrou a importância de modelar as propriedades dos fluidos para o cálculo

das variações de pressões de fundo do poço. O programa computacional desenvolvido permitiu a investigação de geometrias variadas e complexas de poços. Para o cálculo, foram considerados os efeitos das ferramentas de articulação, das borrachas da coluna de perfuração e dos bicos das brocas. As variações das pressões puderam ser calculadas tanto para poço aberto com bomba ligada ou desligada, quanto para poço fechado.

A abordagem de Fontenot e Clark (1974) apresentou limitações. Em algumas circunstâncias, os dois modelos de fluido acoplados ao programa não representaram fielmente o comportamento do escoamento do fluido. Todos os cálculos basearam-se no escoamento do fluido em estado estacionário em uma coluna cilíndrica ou em um anular concêntrico e cilíndrico estacionário. As variações de pressão e os efeitos de aceleração foram incapazes de quebrar a força do gel de lama. Foram feitas comparações dos resultados apresentados pelo programa com dados experimentais em dois poços (Mississipi e Utah), usando três diferentes profundidades do poço.

O trabalho pioneiro em modelos dinâmicos para previsão de pressões de *surge* e *swab* foi realizado por Lubinski et al. (1977), que enfatizou a importância da compressibilidade nos cálculos das pressões.

Lal (1983) desenvolveu um novo modelo dinâmico de pressões de *surge* e *swab* baseado na natureza transitória do fenômeno, por constatar imperfeição nas previsões das pressões de *surge* e *swab* através de modelos estáticos. O estudo apresentou a fricção como parâmetro distributivo e vários outros parâmetros, como geometria do poço, expansão do poço, variação da velocidade de movimentação da coluna, área total dos jatos de broca (área de retorno das brocas), jatos entupidos e propriedades do fluido. O trabalho permitiu não somente a previsão de pressões máximas de *surge* e *swab* e suas variações com o tempo, como também a máxima velocidade segura de movimentação da coluna a partir de uma pressão determinada ou densidade efetiva de circulação (ECD).

Um código computacional, baseado no modelo desenvolvido, permitiu a obtenção de pressões de *surge* e velocidades seguras de movimentação da coluna através do movimento de tubos para revestimento de poços, *liner* ou colunas de

perfuração. O modelo reológico de fluido de lei de Potência foi incorporado ao programa. Entretanto, pequenas variações nas propriedades dos fluidos não apareceram como efeitos significantes como os outros parâmetros do sistema. Foram testados diversos poços, assim como os resultados apresentados no trabalho de Lubinski para validação do trabalho. A partir da simulação computacional de vários exemplos e diversos outros poços, foi concluída como incorreta a previsão das pressões de *surge* e *swab* baseada no escoamento em regime estacionário já que os fluidos apresentam natureza instável. Além disso, os efeitos dos parâmetros considerados possuem relevância diferenciada. O trabalho de Lal, portanto, corrigiu uma série de falhas do trabalho de Lubinski, que além de apresentar diversas limitações, não considerava a fricção como parâmetro distributivo e usava orifícios artificiais, localizados em diversos pontos ao longo do escoamento, para representar as perdas de carga.

Mitchell, em 1988, apresentou o desenvolvimento de um modelo dinâmico capaz de prever pressões de surge consistindo de dois modelos analíticos: coluna de perfuração - anular e coluna - fundo do poço. O autor considerou que as pressões na coluna de perfuração e no anular eram acopladas através da elasticidade da coluna. Assumiu também que a elasticidade longitudinal da coluna e as forças viscosas determinavam o deslocamento da coluna, que as propriedades do fluido eram dependentes de pressão e que a temperatura e a elasticidade da formação, da coluna e do cimento eram utilizadas para determinação da resposta elástica do poço. Os dois modelos foram conectados através de uma série de relações entre força e deslocamento. Mitchell fez ainda uma comparação entre o seu modelo e dados de campo apresentados por Burkhardt e por Clark e Fontenot, obtendo resultados satisfatórios.

O modelo de Bourgoyne et al. (1991), também denominado de modelo de fenda considerou o escoamento laminar em regime estacionário de um fluido de *Bingham* e de potência, tratando o anular como uma fenda. Admitiu-se que a queda de pressão era causada devido ao atrito viscoso para os dois modelos de fluidos e que a coluna apresentava extremidade fechada.

Bing e Kaiji (1996) desenvolveram um modelo dinâmico para previsão das pressões de *surge* e *swab*. Os autores, ao comparar modelos dinâmicos e estacionários,

chegaram à conclusão de que os primeiros permitiam prever estimativas melhores de flutuações das pressões quando a coluna era movimentada. Além de minimizar problemas potenciais no poço, o modelo permitiu o emprego de velocidades de movimentação da coluna mais eficientes. Para o modelo, a profundidade do poço e as propriedades do fluido afetavam o cálculo das variações de pressão de fundo do poço. Poços abertos possibilitaram o uso de velocidades de movimentação da coluna maiores do que em poços fechados. Os resultados calculados pelo modelo obtiveram boa concordância com os dados de teste realizado no Campo de Zhong Yang.

Wang e Chukwu (1996) desenvolveram um trabalho no qual as equações propostas foram resolvidas analiticamente para fluidos de lei de potência não-newtonianos. As soluções das equações foram resolvidas adimensional e graficamente, sendo aplicadas para prever as pressões de *surge* e *swab*. A técnica desenvolvida é fácil de ser entendida e faz uso de um esforço computacional mínimo para determinação das pressões para um mecanismo instável do movimento da tubulação interna em um anel concêntrico. Os resultados do trabalho relataram que as magnitudes das pressões de *surge* e *swab* aumentaram com o aumento da aceleração da tubulação.

O modelo de Sampaio Jr. (2002) foi desenvolvido por meio de um aplicativo para estimar as pressões de *surge* e *swab*. Consideraram-se as seguintes limitações: modelos de fluido de *Bingham* ou de Lei da potência; escoamento incompressível, homogêneo e em regime laminar; anular concêntrico; coluna com extremidade fechada; incluindo a quebra do gel. O modelo se caracterizou por apresentar solução exata para a região anular, considerando pressões de origem viscosa e inercial.

De Almeida et al (2008) desenvolveram um código computacional a fim de possibilitar o cálculo da variação de pressão no interior do poço. Os modelos de fluidos de Bingham, de Lei da Potência e de Herschel-Bulkley foram analisados por se tratarem de modelos de fluidos que se assemelham aos encontrados no mercado. O cálculo das pressões de *surge* e *swab* foi fundamentado no modelo de fator de atrito, desenvolvido por Fontenot e Clark (1974), cujo método é baseado numa solução exata do problema e considera algumas hipóteses simplificadoras, como estado estacionário. Assim, os efeitos viscosos do escoamento foram considerados a causa principal da queda de

pressão. O modelo apresentou limitações e desconsiderou efeitos inerciais, de compressibilidade do fluido e de possíveis efeitos transitórios como a gelificação do fluido de perfuração no início do escoamento. A queda de pressão foi calculada de acordo com a equação de Fanning para o escoamento na região no anular, sendo necessário também o cálculo da velocidade efetiva de escoamento de fluido. Os resultados obtidos pelo programa computacional apresentaram soluções dos diferentes modelos para situações semelhantes muito coerentes. Um estudo de caso analisado mostrou que a massa específica equivalente de circulação e a velocidade de deslocamento da coluna de perfuração relacionaram-se de forma linear, sendo a queda de pressão maior em espaços anulares menores do que em espaços anulares maiores.

3. Modelagem

3.1 Modelos Estudados

A manobra é uma operação complexa que exige esforços para que se evitem riscos que poderiam acarretar em perdas físicas, econômicas e materiais. A modelagem do poço pode ser considerada uma importante ferramenta a fim de se entender melhor o processo de movimentação da coluna. Os gradientes de pressão de fundo do poço obedecem sempre a um limite de valores. Este limite está diretamente ligado às questões físicas, operacionais e de segurança para realização da operação da manobra.

Na literatura são encontrados diversos modelos que prevêm os gradientes da pressão de fundo. Os principais parâmetros que influenciam esta grandeza são: profundidade do poço, diâmetros da coluna e do poço, propriedades do fluido de perfuração, aceleração e velocidade final de movimentação da coluna.

Dentre os trabalhos relevantes, quatro serão analisados. Destacam-se por considerarem o regime estacionário e o escoamento incompressível e laminar. A eles podem ser aplicados fluidos que seguem o modelo da Lei da Potência.

Segue abaixo, na Tabela 3.1, os modelos analisados, suas equações e limitações:

Tabela 3.1. Modelos estudados para previsão dos gradientes das pressões de *surge* e *swab* com seus autores, fórmulas, considerações e limitações.

Modelos	Fórmulas	Considerações (limitações)
Wang & Chukwu (1996)	$\frac{\Delta P}{L} = \frac{k \cdot v_p^{n+1} \cdot P_{d0}}{r_p^{n+1}}$	Regime estacionário; Única fase; Escoamento de fluido

		<p>incompressível;</p> <p>Escoamento em regime laminar;</p> <p>Escoamento isotérmico com propriedades constantes do fluido;</p> <p>Geometria do fluxo paralela, simetria axial;</p> <p>Efeito do deslizamento não considerado;</p> <p>Gravidade desprezível;</p> <p>Tubo fechado.</p>
Bourgoyne et al (1991)	$V = \left(\frac{d_p^2}{d_H^2 - d_p^2} \right) \cdot v_p$ $\frac{\Delta P}{L} = \frac{2 \cdot k \cdot \left(4 + \frac{2}{n} \right)^n}{\left(\frac{d_H}{2} - \frac{d_p}{2} \right)^{n+1}} \cdot V^n$	<p>Escoamento laminar;</p> <p>Regime estacionário;</p> <p>Queda de pressão devido ao atrito viscoso;</p> <p>Aproximação do anular como uma fenda;</p> <p>Fluido de lei de potência.</p>
Fator de Atrito (1974)	$\frac{\Delta P}{L} = \frac{2 \cdot f \cdot \rho \cdot v_p^2}{\sqrt{\frac{2}{3}} \cdot (d_H - d_p)}$ $f = \frac{24}{\text{Re}};$ $\text{Re} = \frac{\rho \cdot v_p \cdot (d_H - d_p)}{\mu_p};$ $\mu_{ap} = k \cdot \dot{\gamma}^{n-1};$ $\dot{\gamma} = \frac{12 \cdot v_{m,f}}{d_H - d_p};$ $v_{m,f} = \frac{r_p^2 \cdot v_p}{d_H^2 - d_p^2}$	<p>Região anular entre tubos concêntricos;</p> <p>Escoamento completamente desenvolvido;</p> <p>Escoamento unidimensional ao longo da coordenada axial;</p> <p>Escoamento permanente e incompressível e laminar;</p> <p>Fluido de perfuração com propriedades constantes;</p> <p>Não há efeitos de elasticidade na coluna;</p> <p>Geometria anular concêntrica;</p> <p>Queda de pressão devido aos efeitos viscosos do escoamento;</p>

		Efeitos inerciais e de compressibilidade do fluido desconsiderados; Efeitos transitórios do escoamento desconsiderados
de Almeida et al (2008)	$\frac{\Delta P}{L} = \frac{f \cdot \rho \cdot v_{ae}^2}{(d_H - d_P)}$ <p>Onde:</p> $f = \frac{24}{Re};$ $Re = \frac{\rho \cdot v_P \cdot (d_H - d_P)}{\mu_{ap}};$ $\mu_{ap} = k \cdot \dot{\gamma}^{n-1};$ $\dot{\gamma} = \frac{12 \cdot v_{m,f}}{d_H - d_P};$ $v_{m,f} = \frac{r_P^2 \cdot v_P}{d_H^2 - d_P^2}$ $v_{ae} = \left[\frac{4 \cdot Q_a}{\pi \cdot (d_H^2 - d_P^2)} \right] + K \cdot v_P$ $Q_a = \frac{\pi \cdot d_P^2 \cdot v_P}{4}$	Cálculo da queda de pressão de acordo com o modelo de fator de atrito

onde:

k : valor do índice de consistência do fluido de lei de potência;

n : índice de comportamento lei de potência;

v_P : velocidade de movimentação da coluna;

P_{d0} : gradiente de pressão adimensional;

r_P : raio interno do tubo externo estacionário;

V : velocidade média do escoamento;

d_P : diâmetro externo da coluna de perfuração;

d_H : diâmetro interno do poço;

f : fator de atrito de Fanning;

ρ : massa específica do fluido;
 μ_{ap} : viscosidade aparente do fluido;
 $v_{m,f}$: velocidade média do fluido;
 γ : taxa de deformação;
 v_{ae} : velocidade efetiva de escoamento do fluido no anular;
 K : fator de aderência (clinging) que considera os efeitos viscosos;
 Q_a : vazão na região anular;
 α : razão entre os diâmetros da coluna e do poço.
 ΔP : variação da pressão de fundo
 L : comprimento do poço

3.2. Modelagem por redes neurais

Na prática, o controle convencional é o mais utilizado. Entretanto, a operação de manobra é um processo complicado e, pode ser que a modelagem encontrada na literatura não se aplique adequadamente ao poço estudado. Dessa forma, foi realizada uma modelagem avançada com o treinamento de redes neurais alimentando os dados dos dois poços citados anteriormente em uma ferramenta denominada *STATISTICA NEURAL NETWORKs* (SNN).

O SNN é um produto do *STATISTICA*, que possui um conjunto de métodos estatísticos e ferramentas para análise, gestão e visualização de bases de dados e *Data Mining*. Apresenta interface gráfica e fluxo de tarefas capaz de reduzir o tempo gasto para geração de métodos analíticos. Contém ainda um módulo estrutural para todas as ferramentas gráficas, de integração e emissão de relatórios, e ainda oferece processos apropriados para recolher, organizar, classificar, apresentar e interpretar um conjunto de dados.

Atualmente, as redes neurais têm sido muito aplicadas em várias áreas de estudo por serem mais vantajosas quando comparadas aos métodos estatísticos lineares convencionais. Dentre as vantagens, citam-se a capacidade de relacionar sistemas altamente não-lineares, a falta de exigência sobre o conhecimento das distribuições das

variáveis de entrada e de saída e a competência no tratamento de ambas as variáveis contínuas ou qualitativas em entrada ou saída do processo. (De Souza, 2005)

O treinamento de redes neuronais requer que os dados sejam bem representativos de modo a possibilitar que a saída do sistema seja uma resposta satisfatória da aprendizagem da rede.

A rede mais comum é do tipo multicamadas, na qual um conjunto de camadas consecutivas se estende desde a camada de entrada até a de saída, passando por camadas intermediárias ou escondidas. No interior destas camadas ficam neurônios que atuam no processamento matemático. A alimentação da camada de entrada é feita com os valores das variáveis de entrada. Cada uma destas variáveis contém um neurônio que se interliga a um nó da camada escondida. Esta unidade então se associa a outra localizada na camada de saída. As camadas de entrada e saída são compostas por um número específico de unidades determinado pela quantidade de variáveis de entrada e de saída, respectivamente. Para a camada escondida, usualmente empregam-se procedimentos de validação cruzada para se determinar o número de unidades. Maiores detalhes podem ser obtidos em De Souza (2005) ou em Haykin (2001).

A Figura 3.1 é a representação esquemática da melhor rede neuronal obtida no estudo e mostra as variáveis da camada de entrada, os neurônios da camada escondida e a variável da camada de saída:

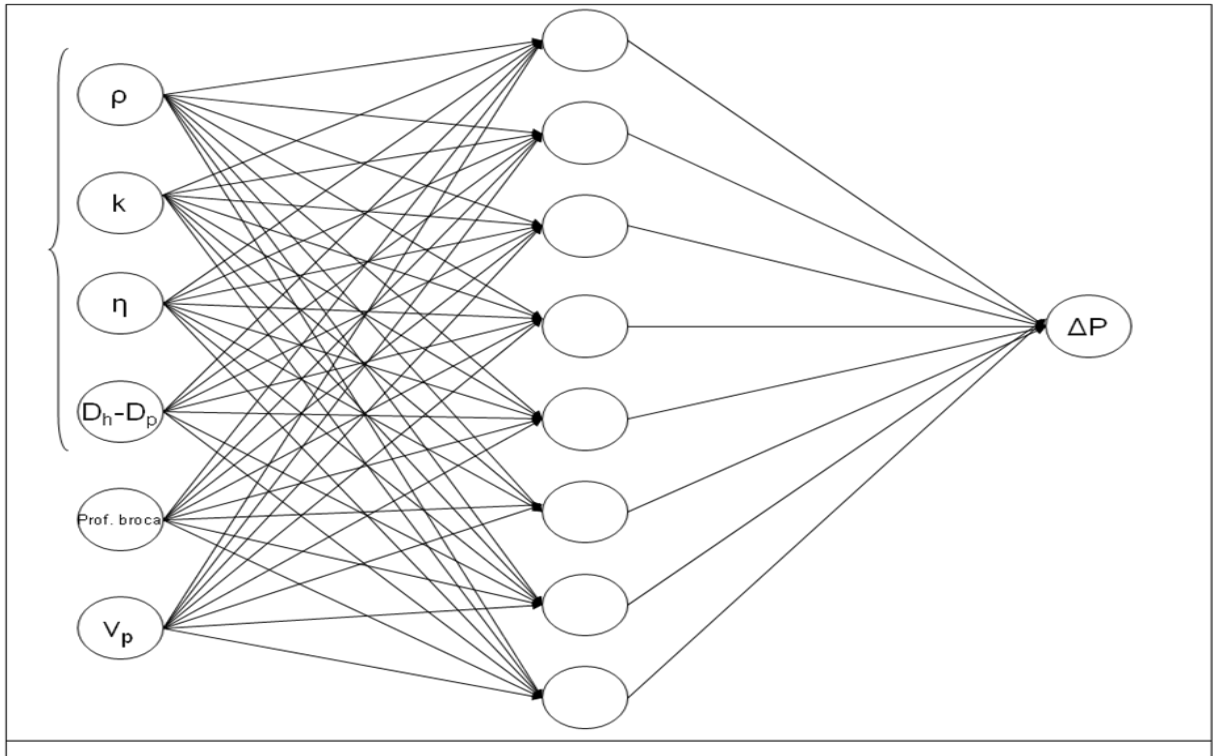


Figura 3.1. Representação esquemática da melhor rede neuronal estudada com os dados dos dois poços estudados.

As variáveis de entrada utilizadas foram: peso do fluido (ρ), valor do índice de consistência do fluido de lei de potência (k), índice de comportamento lei de potência (η), diferença entre o diâmetro interno do poço e o diâmetro externo da coluna ($D_h - D_p$), profundidade da broca (Prof. Broca) e velocidade de movimentação da coluna (v_p). A variável de saída foi o gradiente da pressão de fundo (ΔP).

Cada unidade localizada dentro da camada escondida pode ser desmembrada em duas seções. A primeira aceita valores de saída de todas as unidades na camada anterior a ela enquanto a segunda modifica esta informação recebida, transmitindo-a para as unidades da camada posterior. Cada entrada tem um valor de peso específico, que é guardado pela unidade e multiplicado pelo valor da entrada. Somam-se, então, todos os produtos de valores de pesos e entradas correspondentes. Compara-se este somatório a um valor limite, também conhecido como *thersold* ou bias. O confronto entre estes dois valores pode ser entendido como uma equação linear denominada função de Potencial Pós-Sináptica (PSP). O resultado é enviado para a segunda seção da unidade.

A rede é submetida, continuamente, aos valores conhecidos de entrada e de saída, adequando os pesos e os biases da função PSP de modo a obter uma boa previsão de valores de saída da rede. Os ajustes dos parâmetros de cada unidade são realizados por meio de algoritmos de treinamento que recorrem ao erro e submetidos a várias iterações com os dados de treinamento, um subconjunto dos dados históricos totais. A função de erro global deve ser minimizada para que as iterações sejam finalizadas.

Outro subconjunto de dados, também chamado de dados de verificação ou validação, não relacionados ao procedimento citado anteriormente, é utilizado para o cálculo do erro global. Uma rede pode descrever perfeitamente o sistema quando se recorre somente aos dados de treinamento, porém pode prever muito mal os dados futuros sendo, portanto, fundamental a seleção de dados de validação.

Há ainda um terceiro subconjunto, denominado de dados de teste ou *performance*, que avalia o desempenho da rede independentemente da sua capacidade de generalização. (De Souza, 2005)

Os erros são calculados segundo a fórmula:

$$E_{\text{rms}} = \sum_{i=1}^N (y_i - t_i)^2$$

Onde:

y_i é o valor da variável de saída predita

t_i é o valor da variável de saída experimental

3.3. Descrição dos testes

3.3.1 Poço-escola localizado em Taquipe, Bahia

Em 2010, foi realizado um teste em um poço-escola da PETROBRAS, em Taquipe, Bahia, para previsão dos gradientes das pressões de *surge* e *swab* durante as operações de manobra. Na sonda era limitada a distância de percurso da coluna.

Atualmente, sondas modernas fazem uso de *top-drive*, cuja função é transmitir rotação à coluna e injetar o fluido concomitantemente, o que possibilita a perfuração do poço de três em três tubos, ao invés de um em um quando se utiliza a mesa rotativa. A mesa rotativa fornece rotação à coluna de perfuração, permitindo que o *kelly* deslize livremente em seu interior (Thomas, 2001).

As ausências de um controle efetivo da velocidade de movimentação da coluna e de um sensor de posição do gancho também foram verificadas como fatores limitantes de controle operacional do teste. Foi utilizado um estabilizador durante as operações de descida e subida da coluna de modo a manter a coluna a distâncias equidistantes da parede do poço.

Seguem abaixo, as figuras de dois *kelly's*, um de seção quadrada e outro de seção hexagonal, da mesa rotativa e de um *top-drive*.

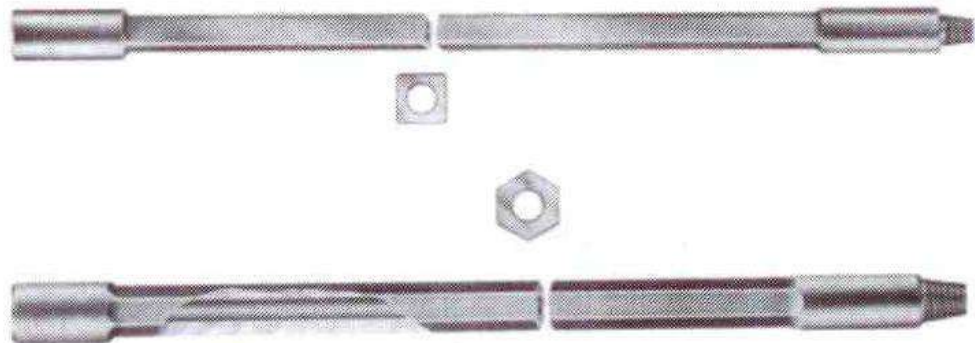


Figura 3.2. Kelly's de seção quadrada e de seção hexagonal. (Thomas,2001)



Figura 3.3. Mesa rotativa (Thomas,2001)

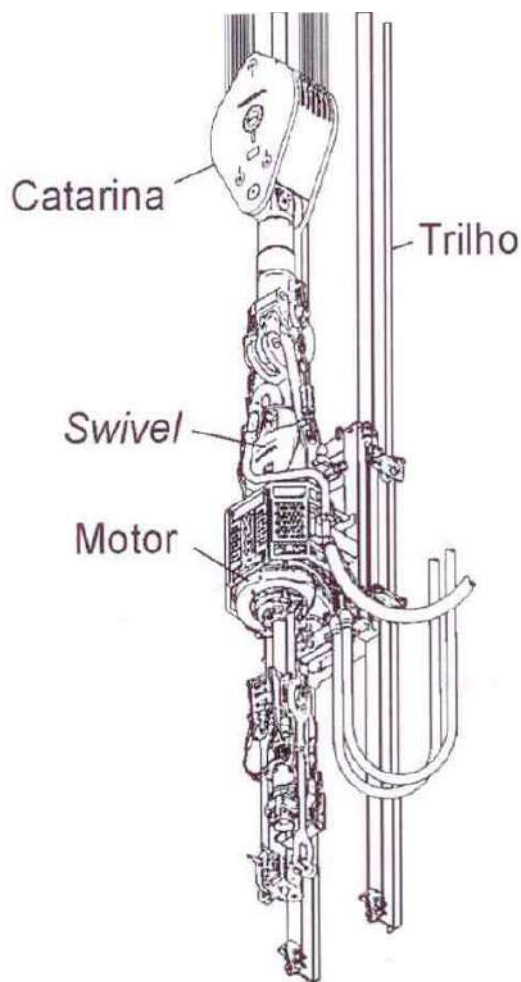


Figura 3.4. Top-drive (Thomas,2001)

A coluna de perfuração apresentava o mesmo comprimento do poço, ou seja, descia até o final do mesmo. A seção da coluna de perfuração utilizada no teste apresentava 30 (trinta) metros de comprimento, porém só foram movimentados 15 (quinze) metros por causa das limitações da sonda. Cordas foram amarradas ao redor da coluna numa distância de 2 (dois) metros entre elas. O intervalo de tempo gasto para a passagem da coluna por um determinado ponto era registrado, conforme eram realizadas as subidas e descidas do equipamento.

O diâmetro interno da parede do poço era de 6,366 in e o diâmetro externo da coluna de perfuração era de 3 in. A profundidade do poço era de 1192,12 m.

O fluido de perfuração utilizado foi o BR-MUL 14.09, cujas propriedades são especificadas na Tabela 3.2, bem como sua leitura reológica na temperatura de 23°C.

Tabela 3.2. Propriedades e leitura reológica do fluido BR-MUL 14.09.

Temperatura		
Leituras	rpm	θ
	600	144
	300	85
	200	63
	100	39
	6	14
	3	14
	G'	25
	G''	35
		G'''
Estabilidade Elétrica		147
Peso: 14,6 ppg		

O modelo de fluido escolhido para aplicação foi o de Lei da Potência, cujos parâmetros obtidos, em unidades SI, estão especificados na Tabela 3.3.

Tabela 3.3. Parâmetros do fluido de Lei da Potência utilizado durante os testes de manobra realizados no poço de Taquipe.

Valor do índice de consistência do fluido de lei de potência ($\text{Pa}\cdot\text{s}^n$)	k	2,74
Índice de comportamento lei de potência	n	0,44

3.3.2 Poço localizado na Bacia de Santos

O poço-escola de Taquipe apresentava um número muito reduzido de dados. Assim, foi analisado um segundo poço, localizado na Bacia de Santos, que estava em fase de perfuração. Os dados foram coletados em tempo real.

O diâmetro interno da parede do poço era de 8,5 in e o diâmetro externo da coluna de perfuração era de 4, 276 in. A profundidade do poço era de 3574,21 m. O fluido de perfuração seguiu o modelo Lei da Potência. A Tabela 3.4 apresenta os parâmetros do fluido utilizado, em unidades SI.

Tabela 3.4. Parâmetros do fluido de Lei da Potência utilizado durante os testes de manobra realizados no poço da Bacia de Santos.

Valor do índice de consistência do fluido de lei de potência ($\text{Pa}\cdot\text{s}^n$)	k	1,38
Índice de comportamento lei de potência	n	0,43

A Tabela 3.5 apresenta os parâmetros do sistema poço-coluna e as propriedades dos fluidos utilizados nos dois poços estudados.

Tabela 3.5. Parâmetros do sistema poço-coluna e das propriedades dos fluidos de perfuração utilizados nos dois poços estudados (Taquipe e Bacia de Santos)

Poço	Diâmetro interno do poço (in)	Diâmetro externo da coluna (in)	Profundidade do poço (m)	Peso do fluido (ppg)	k (Pa.s ⁿ)	n
Taquipe	6,366	3	1192,12	14,6	2,74	0,44
Bacia de Santos	8,5	4,276	3574,21	15,7	1,38	0,43

4. Resultados

4.1. Poço-escola localizado em Taquipe, Bahia

O experimento de manobra em Taquipe foi realizado, cuidadosamente, de modo a considerar somente a aceleração nula. As posições da coluna de perfuração em função do tempo foram registradas. A operação era composta por nove testes, cujas velocidades de movimentação da coluna variaram em alta, lenta e intermediária. A tabela 4.1 representa um exemplo de como foram computados os dados durante um dos testes no poço.

Tabela 4.1. Exemplo de uma tabela de registro dos dados de um dos testes de operação de manobra do poço em Taquipe.

Teste 1 - velocidade lenta constante			
Subida		Descida	
Posição	Tempo	Posição	Tempo
15	43	0	40
14	90	4	67
12	136	6	100
10	190	8	138
8	243	10	194
6	302	12	228
4	364	14	277
2	398	15	328

Após análise das tabelas, foram realizados os cálculos para obtenção das velocidades médias de movimentação da coluna de perfuração para todos os intervalos de tempo. Assim, foram geradas 63 (sessenta e três) velocidades médias para os

experimentos de descida e subida da coluna, num total de 126 (cento e vinte e seis) valores.

Os gradientes das pressões de *surge* e *swab* foram calculados aplicando-se, para cada um dos quatro modelos estudados, os valores das velocidades médias calculados anteriormente, bem como os parâmetros do sistema coluna-poço e as propriedades do fluido de perfuração.

Os gradientes das pressões experimentais médias de *surge* e *swab* também puderam ser obtidos, uma vez que foram disponibilizados gráficos de pressão em função do tempo e da profundidade da broca para cada um dos nove testes, como o exemplo a seguir. Somente foi considerada a curva na qual o poço já se encontrava totalmente perfurado, ou seja, com profundidade igual a 1192,12m.

Segue abaixo a figura 4.1 que relaciona a pressão de fundo com tempo e profundidade da broca, exemplificando como os gradientes de pressão de *surge* e *swab* foram obtidos através das curvas dos gráficos.

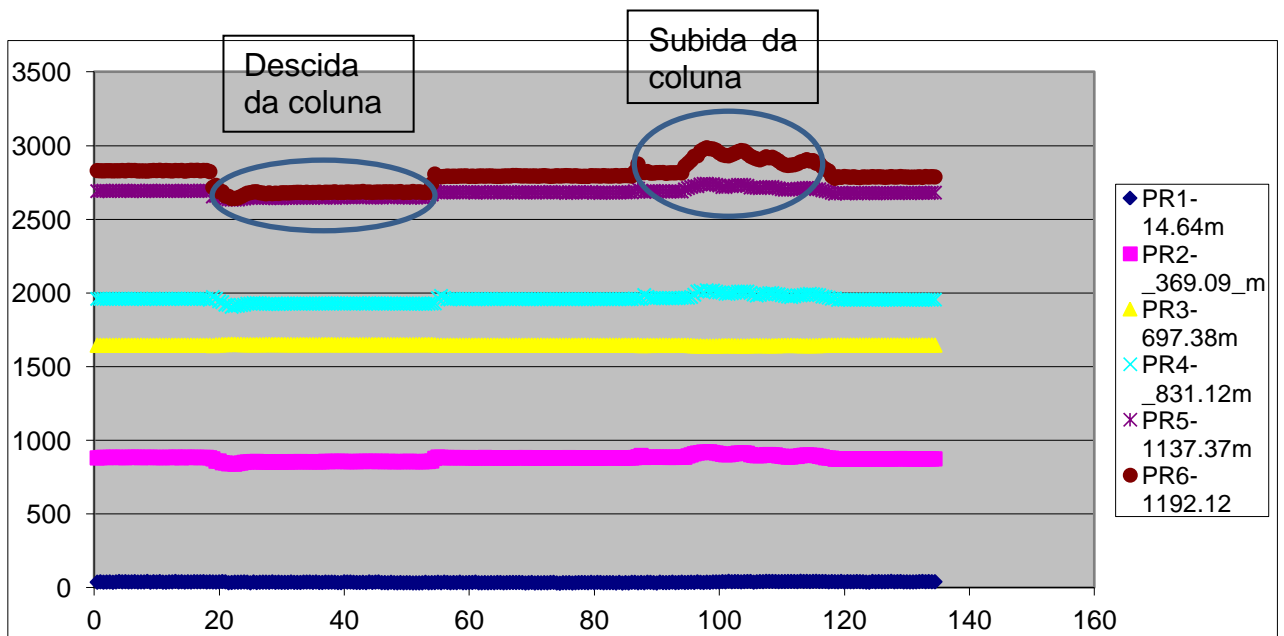


Figura 4.1. Exemplo de gráfico de um dos testes realizados em Taquipe que mostra o comportamento das pressões de *surge* e *swab* em função do tempo e da profundidade da broca. (Petrobras, 2011)

Pela figura 4.1, observam-se também destacadas as operações de descida e de subida da coluna de perfuração. Realizaram-se os cálculos dos gradientes das pressões médias experimentais de *surge* e *swab* para cada intervalo de tempo. A comparação destes valores com os gradientes das pressões de *surge* e *swab* aplicadas aos modelos estudados pôde ser analisada através da construção de gráficos de gradientes de pressão de fundo em função das velocidades médias de movimentação da coluna.

A tendência de dispersão das velocidades de movimentação da coluna também influencia no comportamento dos gradientes de pressão de fundo. Assim, foi construído um gráfico que mostrava o intervalo de valores das velocidades obtidas.

Segue abaixo a figura 4.2 que representa a dispersão das velocidades de movimentação da coluna para o teste de Taquipe, cujas velocidades variaram pouco.

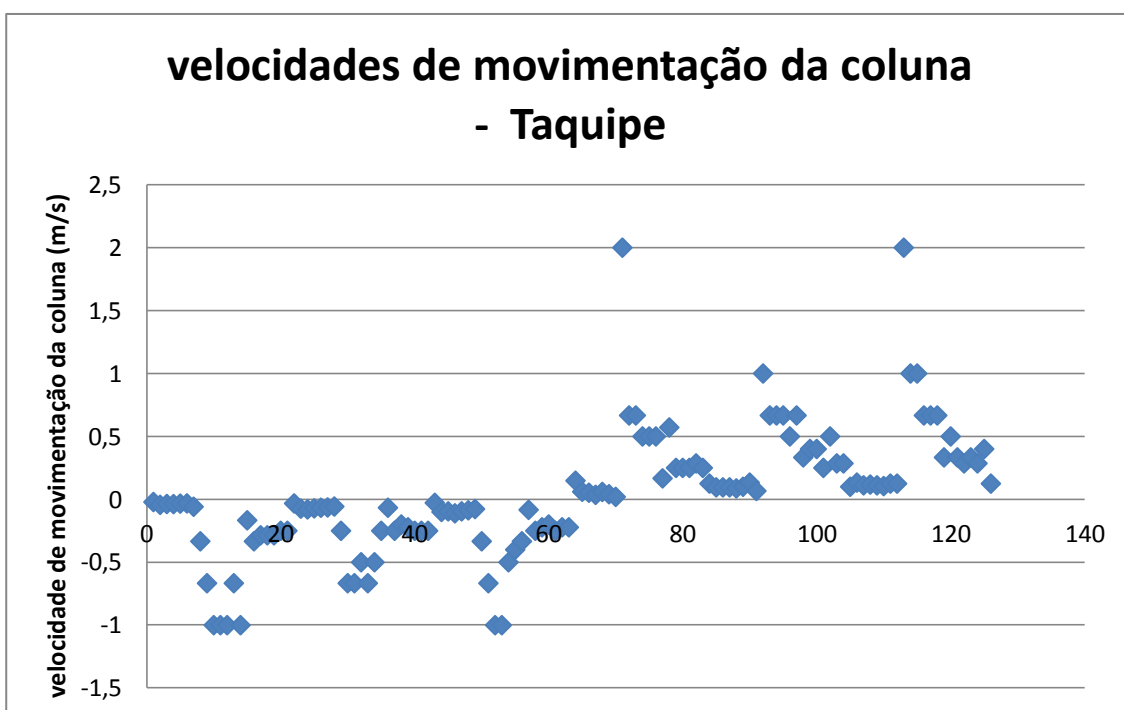


Figura 4.2. Dispersão das velocidades de movimentação da coluna para os testes de manobra realizados no poço de Taquipe.

A seguir, é apresentada a figura de comparação entre os gradientes de pressão de fundo calculados pelos modelos estudados e os valores experimentais para o teste no poço de Taquipe.

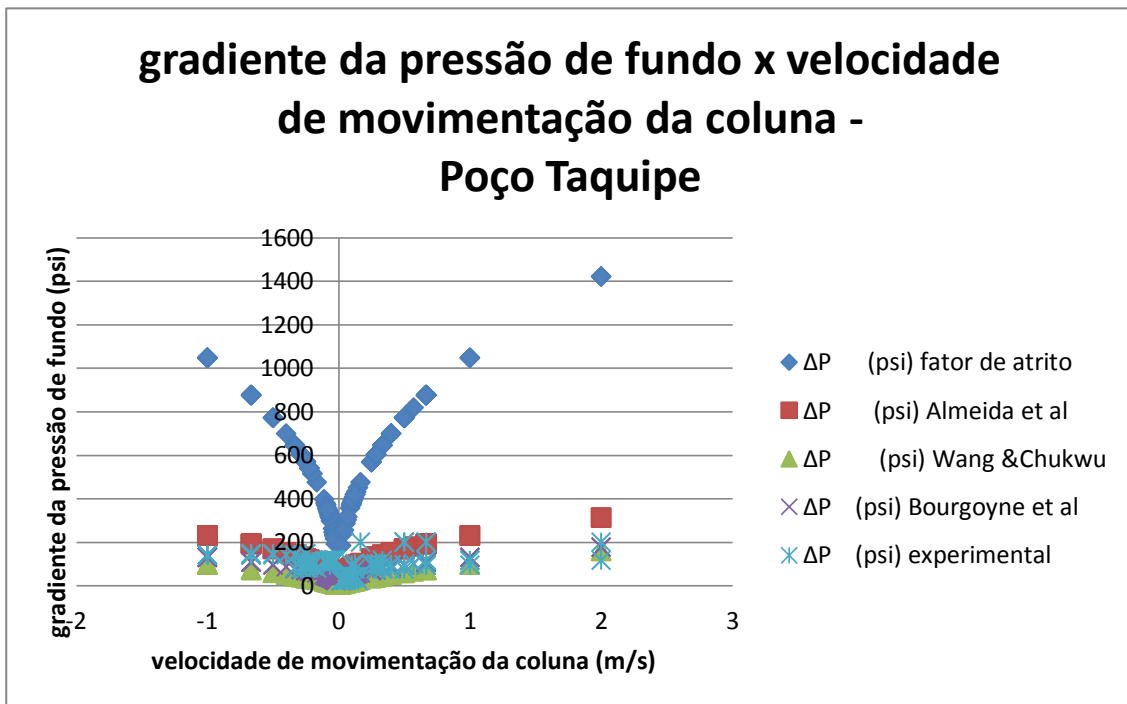


Gráfico 4.3. Comparação entre os valores calculados pelos modelos e os valores experimentais dos gradientes de pressão de fundo em função da velocidade de movimentação da coluna para o teste do poço de Taquipe.

Observa-se que os modelos de Almeida et al, Wang & Chukwu e Bourgoyne et al apresentaram valores próximos aos experimentais. Já o modelo de fator de atrito desvirtuou dos demais.

A seguir, são apresentadas as figuras separadas dos gradientes de pressão de *surge* e de *swab* em função da velocidade média de deslocamento da coluna de perfuração para os modelos estudados, comparando-se com os gradientes das pressões experimentais médias.

A figura 4.4 mostra o comportamento do gradiente de pressão de *swab* com a velocidade média de movimentação da coluna. Ressalta-se que estas velocidades eram negativas e, para o emprego dos modelos, seus valores foram aplicados em módulo.

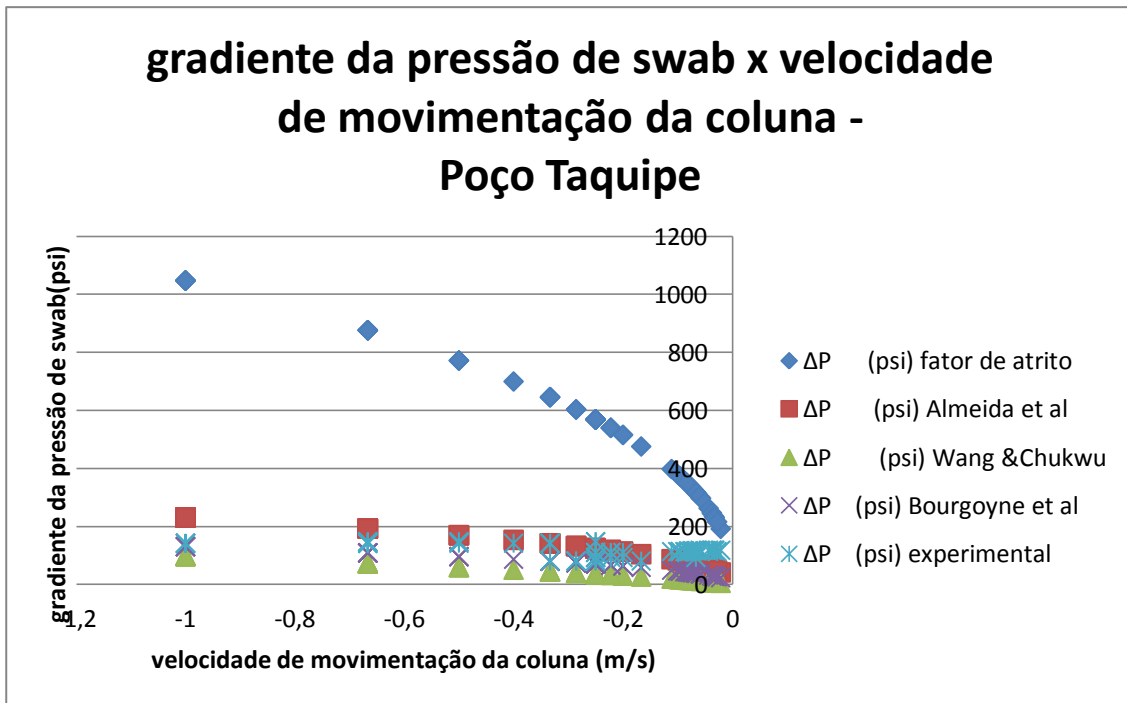


Figura 4.4 Comparação entre os gradientes modelados e experimentais de pressão de *swab* em função da velocidade média de movimentação da coluna durante a operação de subida realizada em teste do poço de Taquipe.

A figura 4.5 representa o comportamento do gradiente de pressão de surge em função da velocidade média de movimentação da coluna. Estas velocidades eram positivas e, para o cálculo dos modelos, não foi necessária nenhuma alteração.

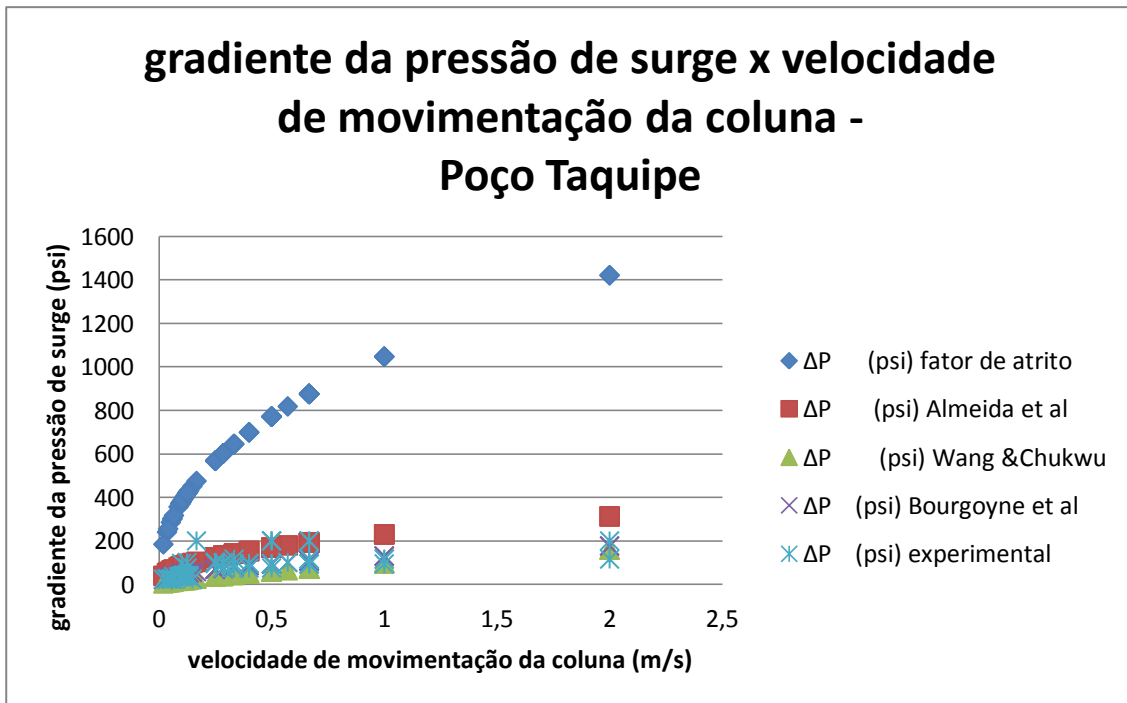


Figura 4.5 Comparação entre os gradientes modelados e experimentais de pressão de *surge* em função da velocidade média de movimentação da coluna durante a operação de descida realizada em teste do poço de Taquipe.

A validação do teste foi verificada através do cálculo do erro médio para os quatros modelos. Analisou-se também a influência das diferentes velocidades (alta, lenta e intermediária) no comportamento dos estudos. O erro médio pode ser definido como o módulo da diferença entre a variação de pressão experimental e a variação da pressão calculada pelo modelo. Assim, pode-se escrever o erro médio absoluto da seguinte forma:

$$\text{erro médio absoluto} = \text{abs}[\Delta P_{\text{experimental}} - \Delta P_{\text{modelo}}],$$

onde:

abs é o valor absoluto da diferença entre os gradientes de pressão de fundo;

$\Delta P_{\text{experimental}}$ é o gradiente de pressão de fundo experimental;

ΔP_{modelo} é o gradiente de pressão calculado pelo modelo estudado.

As tabelas 4.2 e 4.3 mostram os erros médios calculados para os modelos durante as operações de subida e de descida da coluna, respectivamente, em teste realizado no poço de Taquipe.

Tabela 4.2. Comparação entre os erros médios absolutos dos modelos nos cálculos dos gradientes de pressão de *swab* durante a subida da coluna de perfuração.

Modelos	Fator de atrito	de Almeida et al.	Wang & Chukwu	Bougoyne et al.
Erro médio (psi)	441,60	112,87	43,16	48,79
Erro médio velocidade alta (psi)	183,75	113,51	48,75	79,09
Erro médio velocidade lenta (psi)	695,88	135,34	49,07	39,31
Erro médio velocidade intermediária (psi)	445,16	89,76	31,65	27,97

Tabela 4.3. Comparação entre os erros médios absolutos dos modelos nos cálculos dos gradientes de pressão de *surge* durante a descida da coluna de perfuração.

Modelos	Fator de atrito	de Almeida et al.	Wang & Chukwu	Bougoyne et al.
Erro médio (psi)	531,76	55,50	57,83	24,40
Erro médio velocidade alta (psi)	322,16	43,70	45,56	9,82
Erro médio velocidade lenta (psi)	754,02	78,11	80,50	43,72
Erro médio velocidade intermediária (psi)	519,12	44,67	47,45	19,68

Nota-se que os menores valores de erro médio foram obtidos pelo modelo de Wang & Chukwu nos testes de subida da coluna. Pode-se ressaltar, no entanto, que o

modelo de Bourgoyne et al. também apresentou um resultado satisfatório, uma vez que valores de variação de pressão inferiores a 50 psi são considerados pequenos quando comparados às pressões de fundo experimentais, que estiveram na faixa de 2500 a 3000 psi.

Observa-se que o modelo de Bourgoyne et al. foi o que melhor se ajustou aos testes de descida da coluna. Entretanto, pode-se considerar que os modelos de de Almeida et al. e Wang & Chukwu também são aceitáveis, pela mesma justificativa defendida nos testes de subida.

Analisando a variação das velocidades médias de movimentação da coluna, geralmente, notam-se valores de erros médios mais altos ao se deslocar com velocidades lentas e erros médios mais baixos para as velocidades altas.

Comparando-se toda a operação, tanto de descida como de subida, também foi calculado um erro médio para cada modelo. A tabela 4.4 apresenta os erros médios absolutos globais durante os testes no poço de Taquipe.

Tabela 4.4. Comparação entre os erros médios absolutos dos modelos nos cálculos dos gradientes de pressão de fundo durante a manobra do poço de Taquipe.

Modelos	Fator de atrito	de Almeida et al.	Wang & Chukwu	Bourgoyne et al.
Erro médio absoluto (psi)	486,79	48,55	61,65	36,61

Através da comparação da tabela 4.4 entre os erros médios absolutos, foi verificado que o modelo de Bourgoyne et al apresentou o menor valor. Porém, os modelos de de Almeida et al e Wang & Chukwu também mostraram resultados satisfatórios.

Ainda foram calculados os erros percentuais médios relativos para os modelos considerando toda a operação de manobra.

Define-se o erro percentual médio relativo através da fórmula:

$$\text{erro percentual médio relativo} = \text{abs} \left[\frac{\Delta P_{\text{experimental}} - \Delta P_{\text{modelo}}}{\Delta P_{\text{experimental}}} \right],$$

Em que:

abs é o valor absoluto ;

$\Delta P_{\text{experimental}}$ é o gradiente de pressão de fundo experimental;

ΔP_{modelo} é o gradiente de pressão calculado pelo modelo estudado

A seguir, é mostrada a tabela 4.5 com os erros percentuais médios relativos dos modelos.

Tabela 4.5. Comparação entre os erros médios relativos dos modelos nos cálculos dos gradientes de pressão de fundo durante a manobra do poço de Taquipe.

Modelos	Fator de atrito	de Almeida et al.	Wang & Chukwu	Bourgoyne et al.
Erros médios relativos	5,38	0,13	0,58	0,33

Observa-se que o menor erro médio relativo foi obtido pelo modelo de Almeida et al. Mais uma vez, os maiores valores de erros médios foram observados no modelo do fator de atrito.

4.2. Poço localizado na Bacia de Santos

O poço localizado na Bacia de Santos estava em fase de perfuração quando os seus dados foram coletados em tempo real. A quantidade de arquivos para aquisição dos dados era grande e foi precisa uma organização criteriosa de tabelas com as variáveis que influenciavam o cálculo dos modelos.

Foram disponibilizados dois extensos formatos de arquivos. Em um deles, havia dados de tempo e vazão do fluido e no outro, dados de tempo e profundidade da broca.

A seguir é apresentado um recorte da tabela 4.6 que exemplifica parte de um dos modelos de arquivos recebidos em que se têm acesso dados de data, tempo e vazão do fluido de perfuração.

Tabela 4.6. Exemplo de um dos formatos de arquivos que foram disponibilizados para a aquisição dos dados do poço da Bacia de Santos. (Petrobras, 2011)

Data	Tempo	Vazão
(mês/dia/ano)	(Hora:Minuto:Segundo)	(gpm)
5/20/2011	00:01:00	730
5/20/2011	00:02:00	891
5/20/2011	00:03:00	891
5/20/2011	00:04:00	891
5/20/2011	00:05:00	891
5/20/2011	00:06:00	808
5/20/2011	00:07:00	0
5/20/2011	00:08:00	0
5/20/2011	00:09:00	104
5/20/2011	00:10:00	247
5/20/2011	00:11:00	0
5/20/2011	00:12:00	15
5/20/2011	00:13:00	0
5/20/2011	00:14:00	0
5/20/2011	00:15:00	0
5/20/2011	00:16:00	84
5/20/2011	00:17:00	188
5/20/2011	00:18:00	500
5/20/2011	00:19:00	834

5/20/2011	00:20:00	891
5/20/2011	00:21:00	892
5/20/2011	00:22:00	891
5/20/2011	00:23:00	891
5/20/2011	00:24:00	890
5/20/2011	00:25:00	890
5/20/2011	00:26:00	894
5/20/2011	00:27:00	892
5/20/2011	00:28:00	890
5/20/2011	00:29:00	890

Nota-se, na primeira coluna, a data de coleta dos dados do processo. Na segunda, estão os horários e, na terceira, a vazão de fluido de perfuração (em unidades de gpm). Observa-se que algumas linhas das colunas estão circuladas com a cor vermelha para ressaltar que, nestes períodos, a vazão do fluido de perfuração era nula, ou seja, estariam sendo realizadas as operações de manobra.

Segue abaixo outro recorte da tabela 4.7 que exemplifica parte de um dos modelos do outro formato de arquivo, em que foram disponibilizados dados de tempo, profundidade da broca e pressão no anular.

Tabela 4.7. Exemplo de uma parte de um dos arquivos recebidos para coleta dos dados do poço da Bacia de Santos.

Horário	Data	Profundidade Broca (m)	Pressão no anular (psi)
00:01:00	20-May-11	3130.22	4916.00
00:01:10	20-May-11	3130.22	4912.00
00:01:20	20-May-11	3130.18	4897.00
00:01:30	20-May-11	3130.21	4888.00
00:01:40	20-May-11	3130.25	4888.00
00:01:50	20-May-11	3130.19	4880.00

00:02:00	20-May-11	3130.31	4877.00
00:02:10	20-May-11	3130.22	4887.00
00:02:20	20-May-11	3130.22	4905.00
00:02:30	20-May-11	3130.17	4925.00
00:02:40	20-May-11	3130.20	4925.00
00:02:50	20-May-11	3130.20	4928.00
00:03:00	20-May-11	3130.20	4917.00
00:03:10	20-May-11	3130.20	4912.00
00:03:20	20-May-11	3130.22	4879.00
00:03:30	20-May-11	3130.26	4867.00
00:03:40	20-May-11	3130.32	4867.00
00:03:50	20-May-11	3130.26	4853.00
00:04:00	20-May-11	3130.35	4860.00
00:04:10	20-May-11	3130.34	4861.00
00:04:20	20-May-11	3130.34	4853.00
00:04:30	20-May-11	3130.22	4855.00
00:04:40	20-May-11	3130.20	4855.00
00:04:50	20-May-11	3130.15	4848.00
00:05:00	20-May-11	3130.42	4847.00
00:05:10	20-May-11	3130.37	4846.00
00:05:20	20-May-11	3130.23	4846.00
00:11:00	20-May-11	3130.21	4847.00
00:11:10	20-May-11	3130.30	4844.00
00:11:20	20-May-11	3130.25	4837.00
00:11:30	20-May-11	3130.22	4835.00
00:11:40	20-May-11	3130.32	4835.00
00:11:50	20-May-11	3130.20	4848.00
00:12:00	20-May-11	3130.09	4854.00
00:12:10	20-May-11	3130.49	4854.00
00:12:20	20-May-11	3130.46	4853.00
00:12:30	20-May-11	3130.41	4853.00
00:12:40	20-May-11	3130.12	4853.00
00:12:50	20-May-11	3130.16	4857.00

00:13:00	20-May-11	3130.17	4859.00
00:13:10	20-May-11	3130.24	4880.00
00:13:20	20-May-11	3130.24	4875.00
00:13:30	20-May-11	3130.21	4862.00
00:13:40	20-May-11	3130.28	4862.00
00:13:50	20-May-11	3130.34	4863.00
00:14:00	20-May-11	3130.27	4862.00
00:14:10	20-May-11	3130.21	4862.00
00:14:20	20-May-11	3130.18	4866.00
00:14:30	20-May-11	3130.21	4870.00
00:14:40	20-May-11	3130.26	4870.00
00:14:50	20-May-11	3130.30	4870.00
00:15:00	20-May-11	3130.30	4868.00
00:15:10	20-May-11	3130.22	4872.00
00:15:20	20-May-11	3130.23	4884.00
00:15:30	20-May-11	3130.23	4880.00

Observa-se, na primeira coluna, o horário, na segunda, a data de realização da operação, na terceira, a profundidade da broca (em metros) e, na quarta coluna, a pressão no anular (em psi). Estão circulados, em vermelho, os mesmos intervalos de tempo do processo verificados no primeiro tipo de arquivo em que se executava a manobra.

A organização dos dados foi feita através da análise do primeiro modelo de arquivo, em que estavam disponíveis dados de tempo e de vazão do fluido de perfuração. Todos os intervalos de tempo em que se verificava nula a vazão de fluido de perfuração foram anexados a uma tabela. Com os dados de tempo, percorreu-se o outro modelo de arquivo e tanto a profundidade da broca como a pressão no anular foram agrupados.

Após a extensa coleta, foram calculadas as velocidades médias de movimentação da coluna para cada intervalo de tempo, do mesmo modo como haviam sido geradas as velocidades para o poço-escola de Taquipe.

Segue abaixo a dispersão das velocidades de movimentação da coluna durante a operação de manobra no poço da Bacia de Santos.

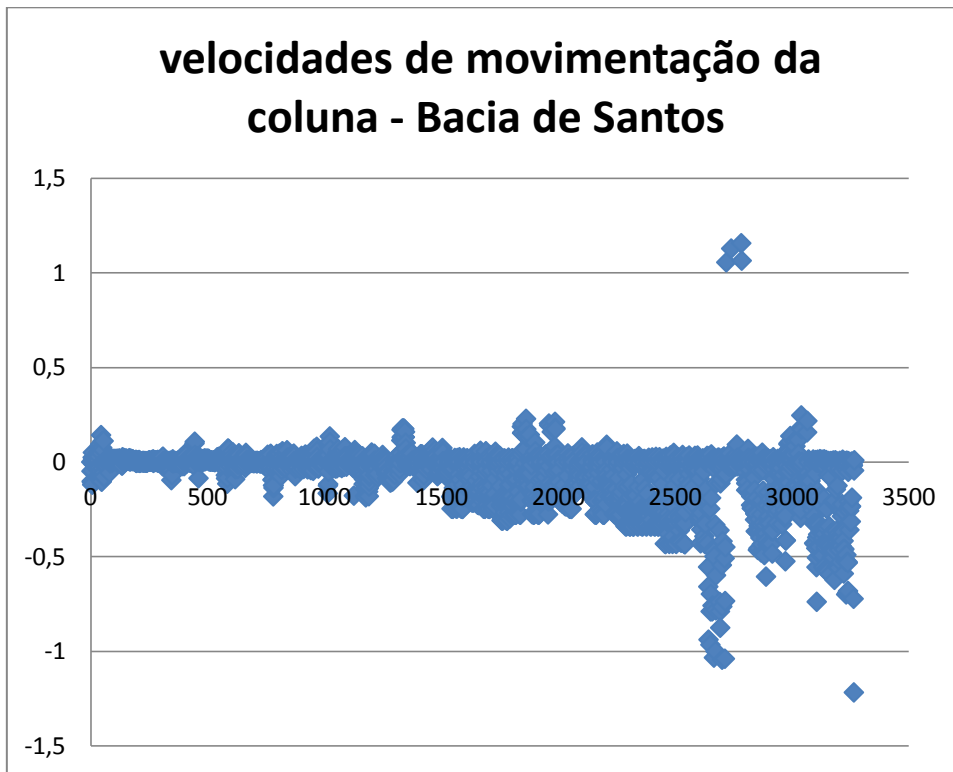


Figura 4.6. Dispersão das velocidades de movimentação da coluna para o poço de Santos.

Agrupando-se todos os dados de Taquipe e da Bacia de Santos, os dois poços puderam ser modelados, concomitantemente.

Segue abaixo a dispersão das velocidades de movimentação da coluna durante a operação de manobra nos poços de Taquipe e da Bacia de Santos.

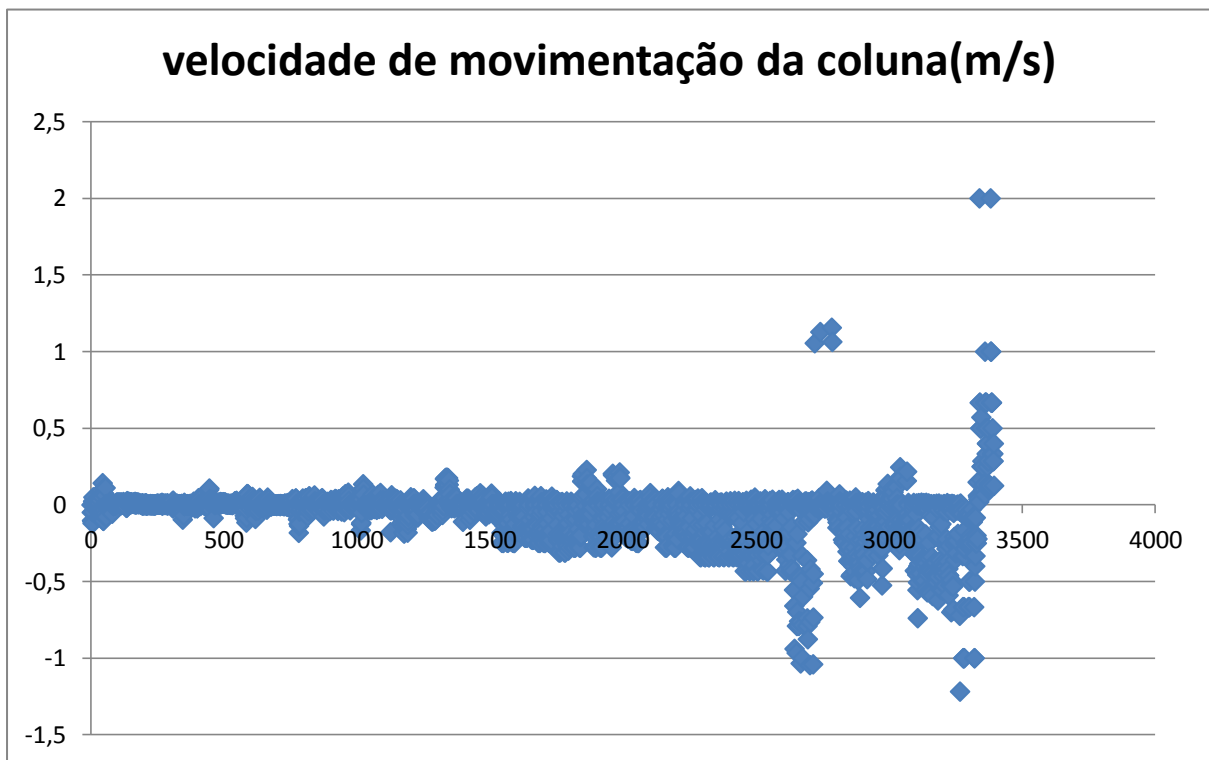


Figura 4.7. Dispersão das velocidades de movimentação da coluna dos dois poços estudados (Taquipe e Bacia de Santos).

As velocidades médias de movimentação da coluna de perfuração, bem como as propriedades do fluido e os parâmetros do sistema poço-coluna foram aplicados a cada um dos quatro modelos. Os gradientes de pressão experimental também foram gerados a partir dos valores das pressões no anular disponíveis nos arquivos. Foram construídos então os gráficos comparativos dos gradientes de pressão de fundo em função da velocidade de movimentação da coluna.

A seguir, é mostrado o gráfico do gradiente de pressão de fundo em função da velocidade de movimentação da coluna para os dois poços (Taquipe e Bacia de Santos) durante a operação de manobra.

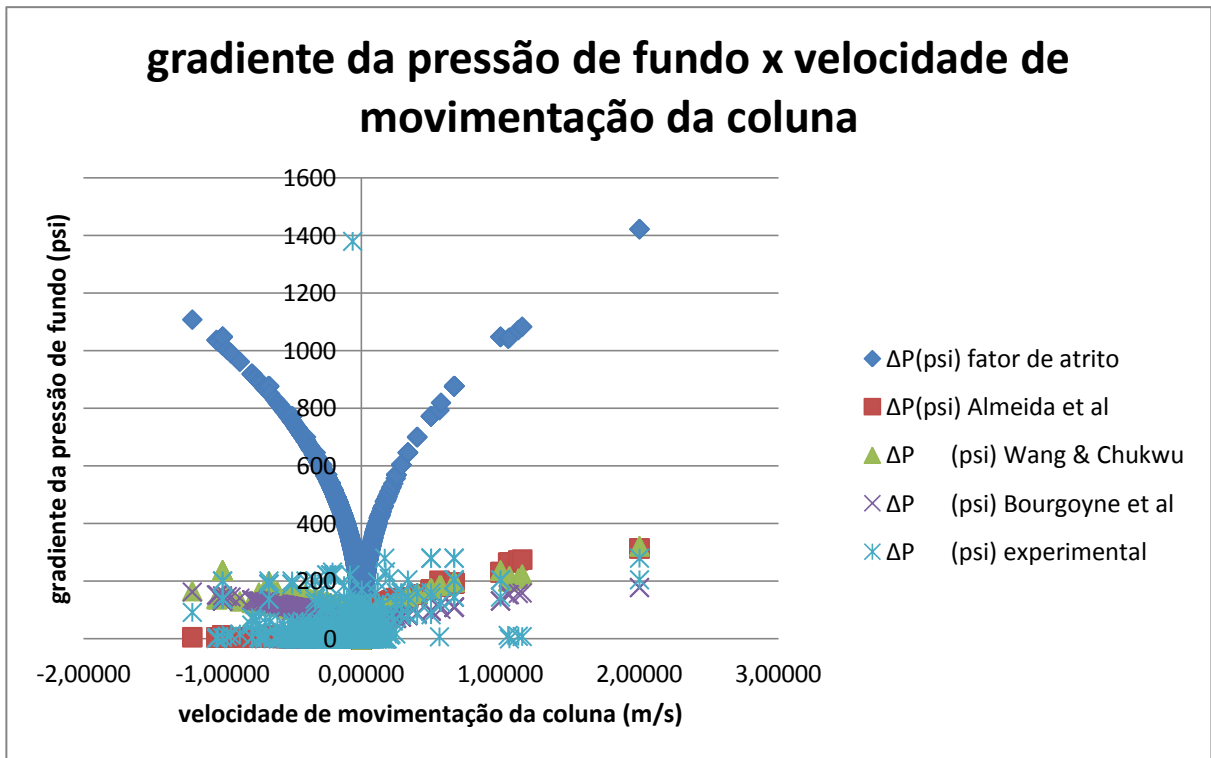


Figura 4.8. Comparação entre os gradientes experimentais e modelados da pressão de fundo em função da velocidade de movimentação da coluna para os dois poços (Taquipe e Bacia de Santos).

Seguem os gráficos comparativos entre os gradientes experimentais e modelados da pressão de *swab* em função da velocidade de movimentação da coluna, na figura 4.9, e da pressão de surge, na figura 4.10, para as operações de manobra observadas nos testes dos dois poços estudados.

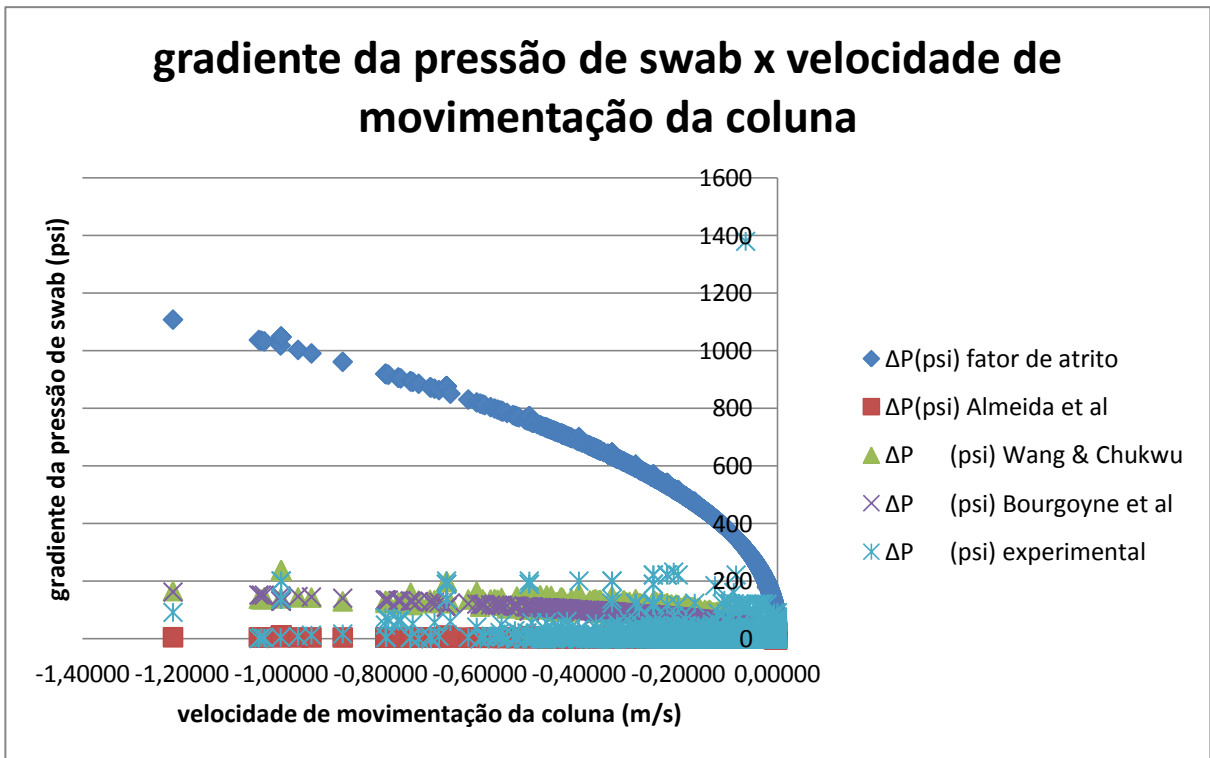


Figura 4.9. Comparação entre os gradientes experimentais e modelados da pressão de swab em função da velocidade de movimentação da coluna para os dois poços (Taquiipe e Bacia de Santos).

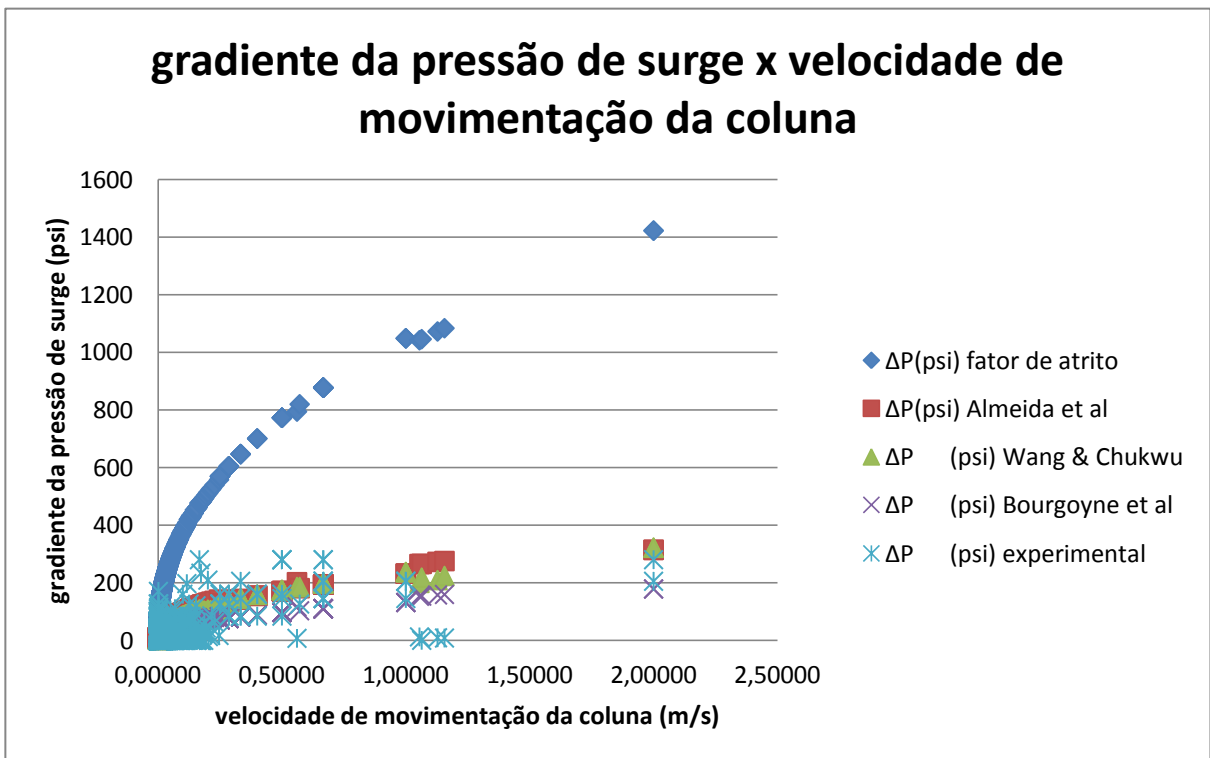


Figura 4.10. Comparação entre os gradientes experimentais e modelados da pressão de *surge* em função da velocidade de movimentação da coluna para os dois poços (Taquipe e Bacia de Santos).

4.3. Filtragem dos dados

Após esta análise, foi feita uma grande filtragem dos dados de velocidade de movimentação da coluna para verificação se os ruídos do processo afetavam as respostas dos modelos. Os ruídos podem ser entendidos como pequenas flutuações da coluna de perfuração. Os dados foram organizados em uma grande tabela. Quando, após uma lista de valores de velocidades positivas, se observou um valor negativo, este foi descartado. O mesmo foi feito para as velocidades positivas, excluindo as negativas que estivessem naquele intervalo de dados.

Segue abaixo a dispersão das velocidades de movimentação da coluna de perfuração. Cerca de 2200 (duas mil e duzentas) velocidades foram analisadas. Nota-se que seus valores variaram pouco, entre -1,5 e 2 m/s.

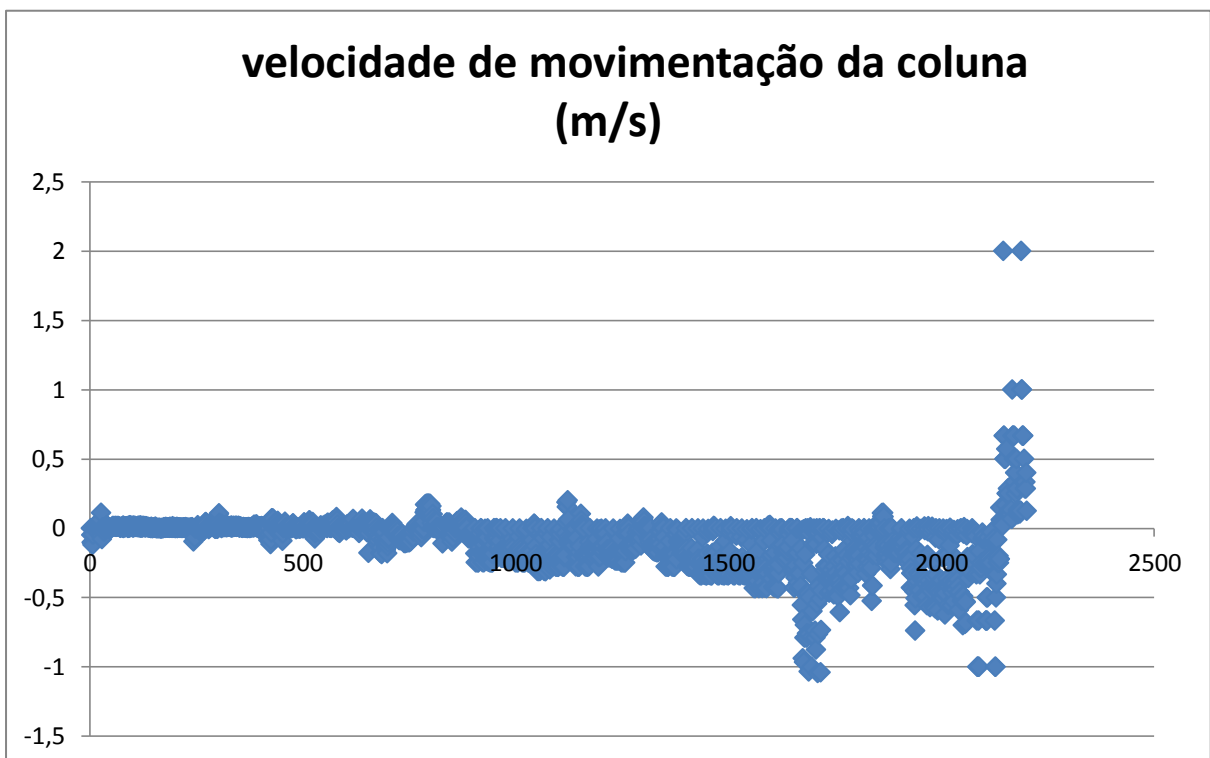


Figura 4.11. Dispersão dos valores de velocidades médias de movimentação da coluna dos dois poços após a filtragem dos dados.

O gráfico abaixo representa a comparação entre os gradientes experimentais e modelados da pressão de fundo em função da velocidade de movimentação da coluna para o poço da Bacia de Santos após a filtragem dos dados.

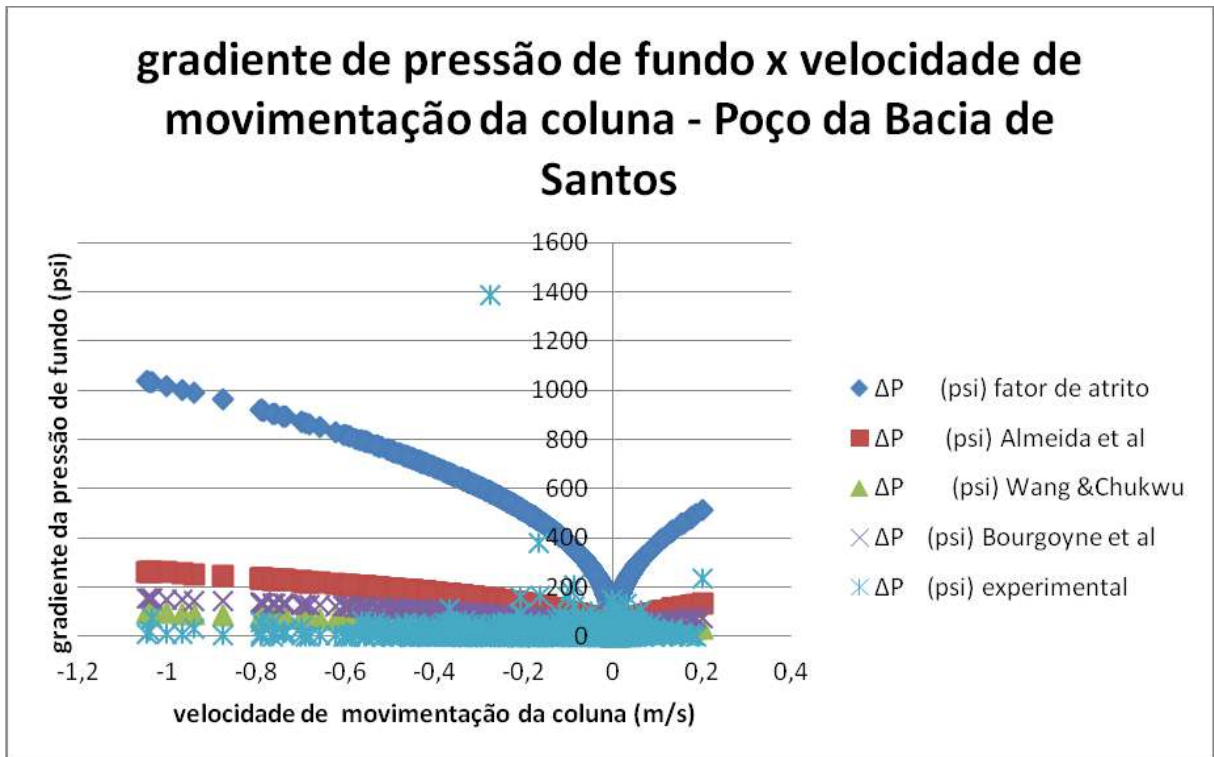


Figura 4.12. Comparação entre os gradientes experimentais e modelados da pressão de fundo em função da velocidade de movimentação da coluna para o poço da Bacia de Santos após filtragem dos dados.

O gráfico a seguir representa a variação da pressão de fundo em função da velocidade de movimentação da coluna para os dois poços (Taquipe e Bacia de Santos) após a filtragem dos dados.

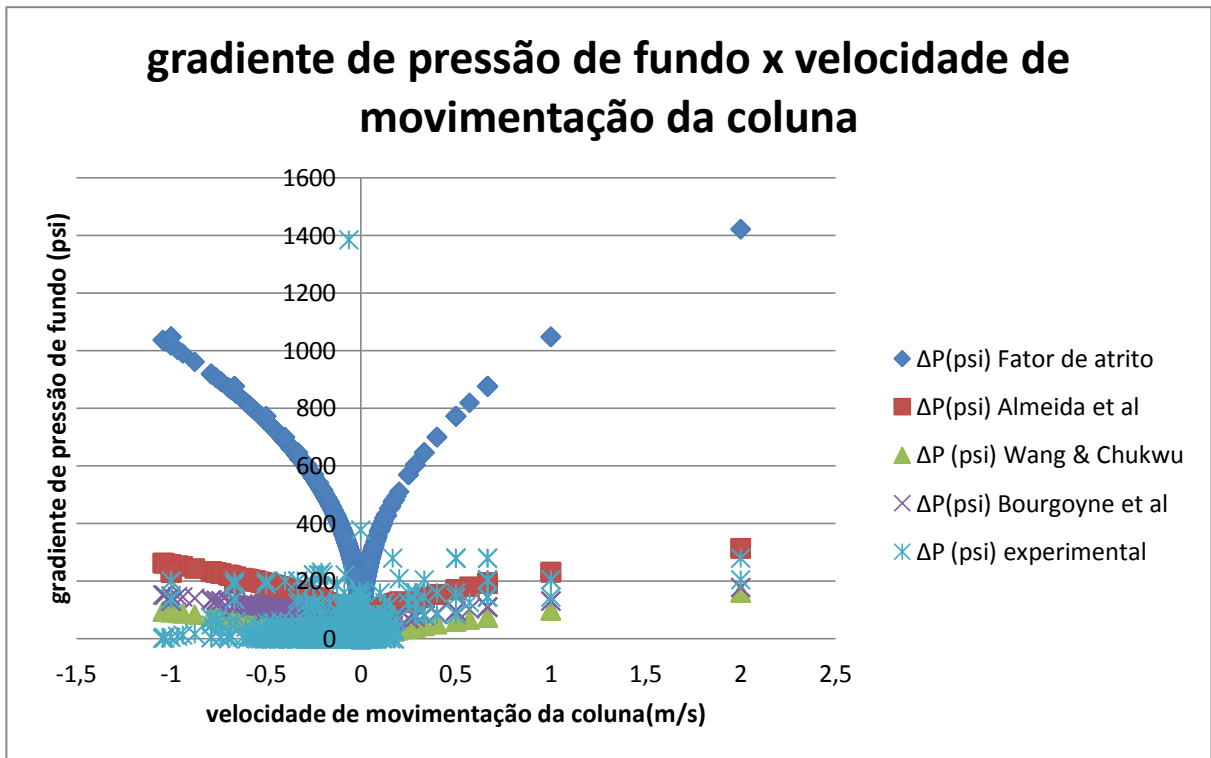


Figura 4.13. Comparação entre os gradientes experimentais e modelados da pressão de fundo em função da velocidade de movimentação da coluna para os dois poços (Taquiipe e Bacia de Santos) após filtragem dos dados.

Os gráficos comparativos entre os gradientes de pressão de *surge* e *swab* também podem ser mostrados separadamente. Na figura 4.14, se observa o gradiente da pressão de *swab* em função da velocidade de movimentação da coluna e, na figura 4.15, o gradiente da pressão de *surge* para os dois poços (Taquiipe e Bacia de Santos) após a filtragem dos dados.

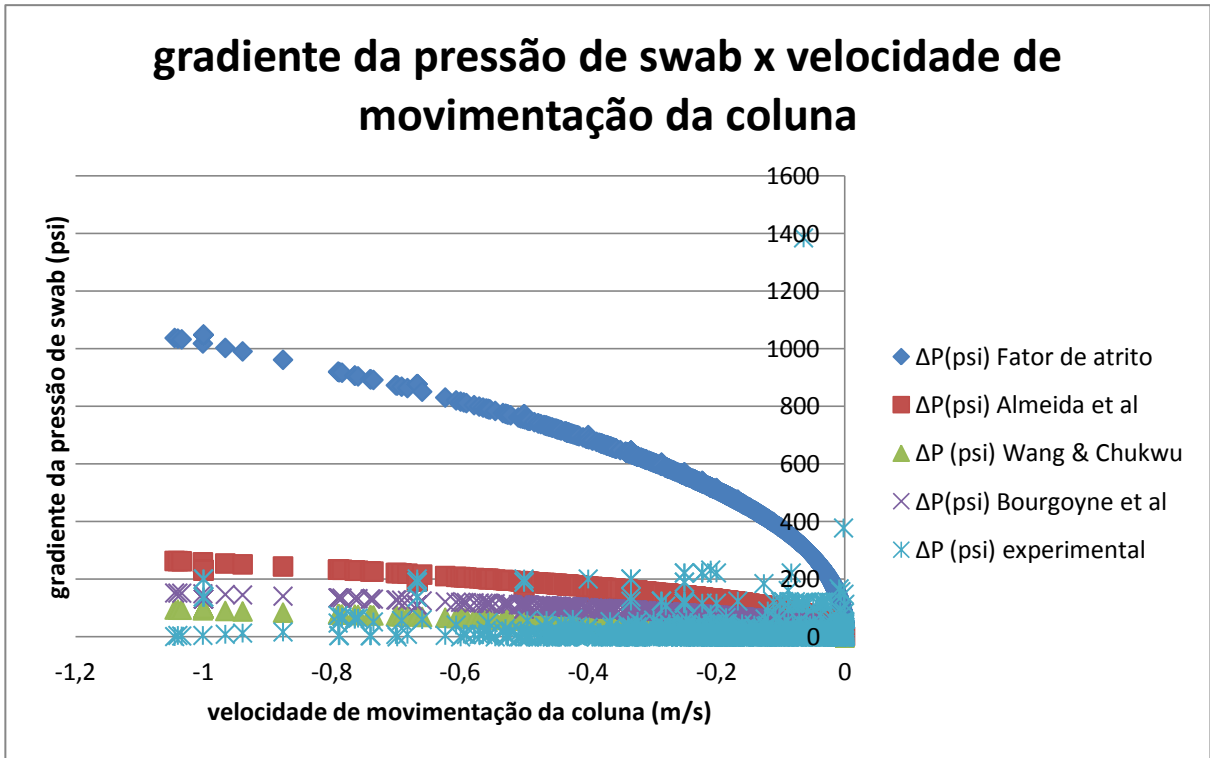


Figura 4.14. Comparação entre os gradientes experimentais e modelados da pressão de swab em função da velocidade de movimentação da coluna para os dois poços (Taquiipe e Bacia de Santos) após filtragem dos dados.

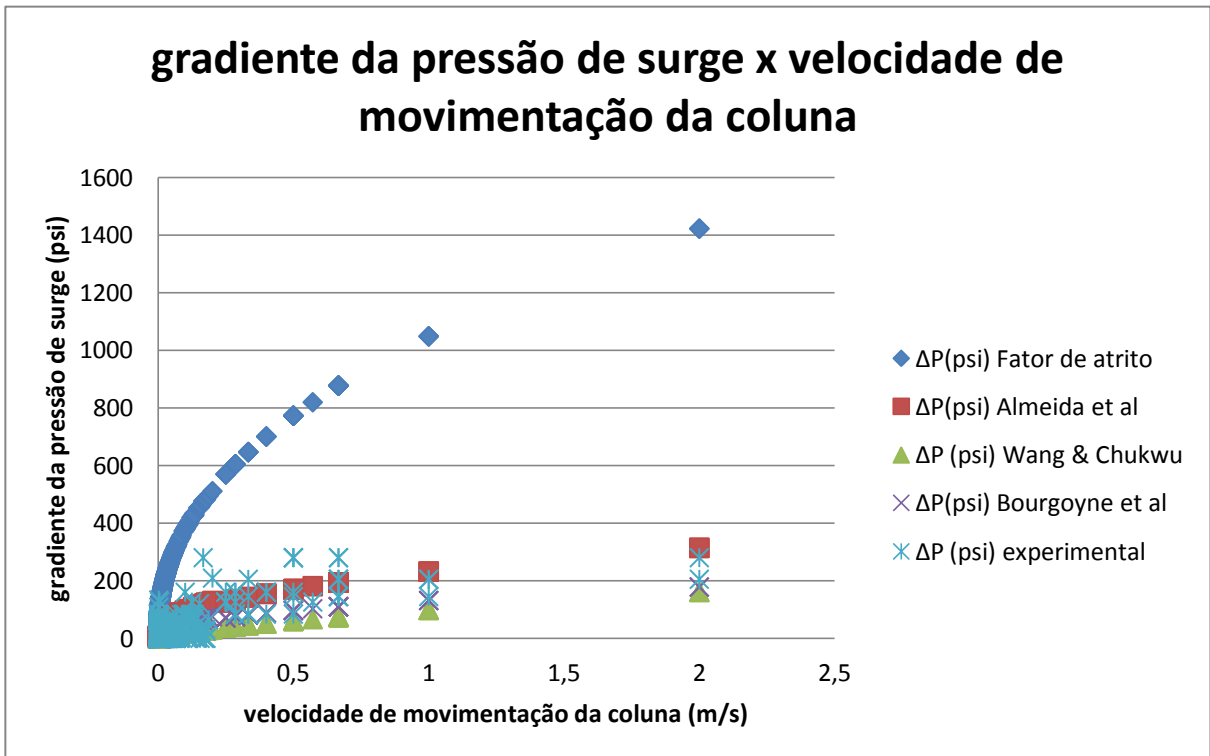


Figura 4.15. Comparação entre os gradientes experimentais e modelados da pressão de *surge* em função da velocidade de movimentação da coluna para os dois poços (Taquipe e Bacia de Santos) após filtragem dos dados.

Também foram calculados os erros médios absolutos para cada modelo estudado, considerando os dois poços após filtragem dos dados. A tabela 4.8 apresentada faz uma comparação entre esses valores.

Tabela 4.8. Comparação entre os erros médios absolutos dos quatro modelos estudados após filtragem dos dados.

Modelos	Fator de atrito	de Almeida et al	Wang & Chukwu	Bourgoyne et al
Erro médio absoluto (psi)	324,57	73,94	23,31	44,28

O modelo de Wang & Chukwu apresentou o menor erro médio absoluto após filtragem dos dados. O trabalho de Bourgoyne et al. também pode ser considerado um modelo representativo.

4.4. Aplicação de Redes Neurais

O treinamento foi realizado agregando-se os dados dos dois poços. As variáveis de entrada escolhidas foram: velocidade de movimentação da coluna, valor de índice de consistência do fluido de lei de potência (k), índice de comportamento de lei de potência (η), peso do fluido (ρ), comprimento do poço (L) e diferença entre os diâmetros do poço e da coluna ($D_h - D_p$). A variável de saída foi o gradiente de pressão de fundo. Foram rodadas 1000 (mil) redes e foram escolhidas as cinco melhores.

Os seguintes parâmetros mostrados na tabela 4.9 foram levados em consideração para a construção das redes neuronais para os dois poços.

Tabela 4.9. Definição dos parâmetros utilizados para a construção das redes neuronais para o poço da Bacia de Santos.

Número de redes de treinamento	1000
Número de variáveis de entrada	6
Número de neurônios na camada escondida	6-12
Número de variáveis de saída	1
Tipo da rede	MLP
Critério	“ <i>validation performance</i> ”
Proporção entre tamanhos das amostras de treinamento:teste:validação	70:20:10

Abaixo, é apresentada a tabela 4.10 gerada pelo *SNN*, a partir dos dados representativos dos dois poços (Taquipe e da Bacia de Santos), com as cinco melhores redes neuronais e seus respectivos erros de treinamento (*training error*), validação (*validation error*) e teste (*test error*).

Tabela 4.10. Representação das cinco melhores redes obtidas após treinamento no *SNN* a partir dos dados dos poços de Taquipe e da Bacia de Santos.

Summary of active networks (Spreadsheet21)											
Index	Net. name	Training perf.	Test perf.	Validation perf.	Training error	Test error	Validation error	Training algorithm	Error function	Hidden activation	Output activation
1	MLP 6-11-1	0,662378	0,706433	0,818046	0,000360	0,000114	0,000094	BFGS 56	SOS	Tanh	Exponential
2	MLP 6-7-1	0,662664	0,703058	0,818968	0,000360	0,000116	0,000095	BFGS 88	SOS	Tanh	Tanh
3	MLP 6-8-1	0,661867	0,703362	0,815662	0,000360	0,000116	0,000096	BFGS 110	SOS	Tanh	Identity
4	MLP 6-11-1	0,661657	0,703137	0,817499	0,000360	0,000116	0,000096	BFGS 112	SOS	Tanh	Tanh
5	MLP 6-9-1	0,662016	0,703091	0,818490	0,000360	0,000116	0,000095	BFGS 146	SOS	Tanh	Tanh

A seguir, é apresentada a tabela 4.11 com os coeficientes de correlação de validação das cinco melhores redes rodadas para o poço de Taquipe e da Bacia de Santos.

Tabela 4.11. Representação dos coeficientes de correlação de treinamento das cinco melhores redes para o poço de Taquipe e da Bacia de Santos.

Correlation coefficients (Spreadsheet21)	
Samples: Validation	
	deltap_exp Validation
1.MLP 6-11-1	0,818046
2.MLP 6-7-1	0,818968
3.MLP 6-8-1	0,815662
4.MLP 6-11-1	0,817499
5.MLP 6-9-1	0,818490

Para melhor entendimento da respostas da *performance* do treinamento das redes para os dois poços, foram gerados gráficos de desempenho de treinamento, de teste e de validação, assim como haviam sido feitos para os poços separadamente.

A figura 4.16 apresentada a seguir mostra a *performance* de treinamento para os poços de Taquipe e da Bacia de Santos.

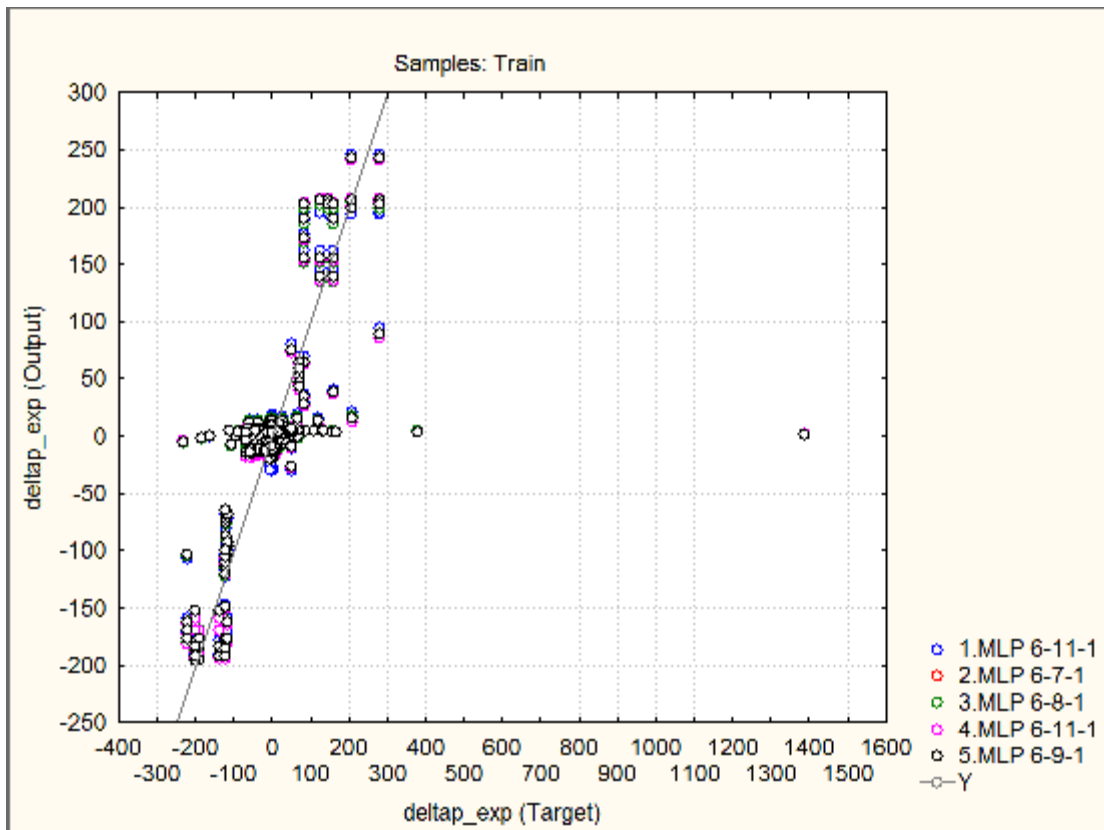


Figura 4.16. Representação do desempenho de treinamento das redes para os poços de Taquipe e da Bacia de Santos.

A figura 4.17 mostra o desempenho de teste para os poços de Taquipe e da Bacia de Santos.

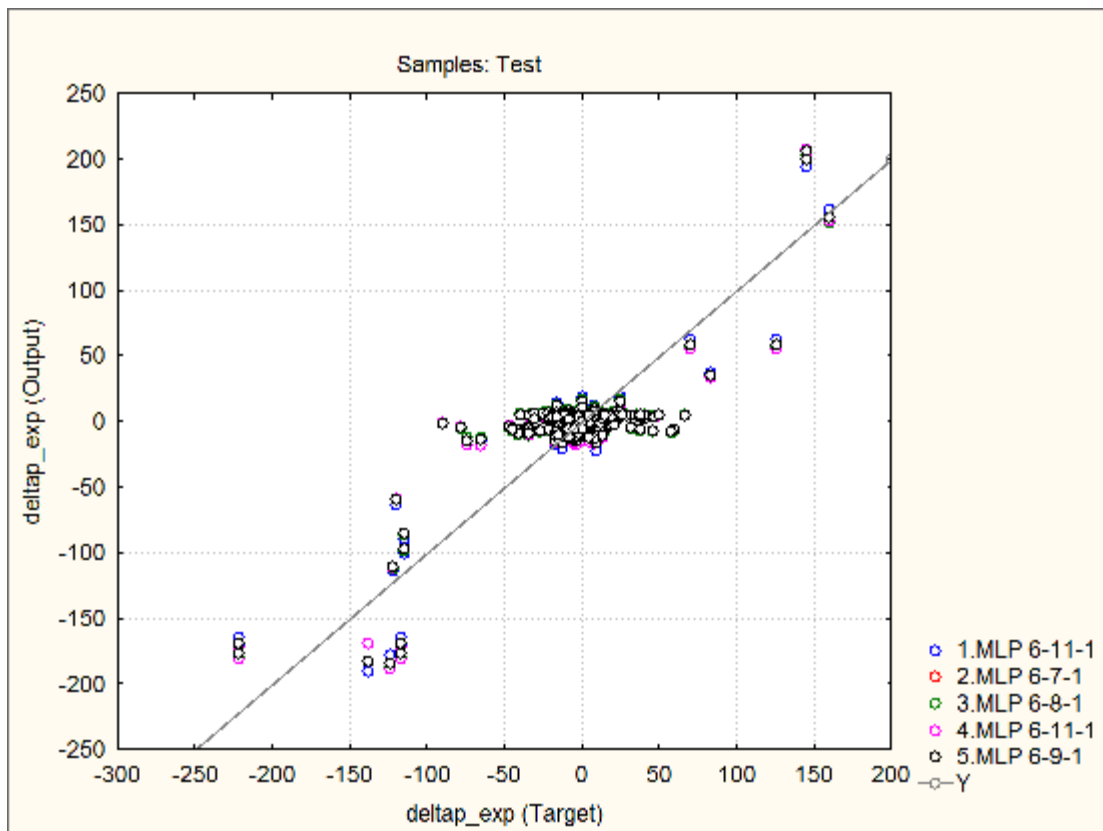


Figura 4.17. Representação do desempenho de teste para os poços de Taquipe e da Bacia de Santos.

A figura 4.18 apresenta o desempenho de validação de teste para os poços de Taquipe e da Bacia de Santos.

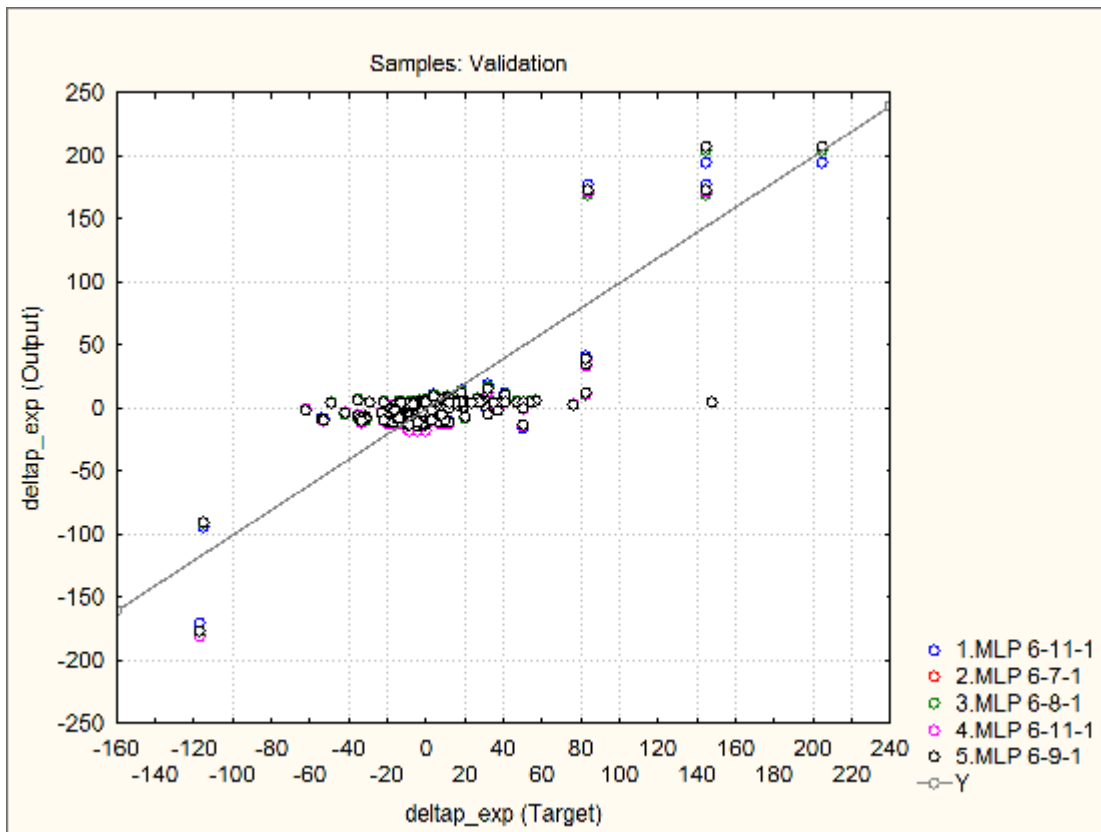


Figura 4.18. Representação do desempenho de validação para os poços de Taquipe e da Bacia de Santos.

O treinamento das redes neurais foi satisfatório. Embora tenha se atingido aproximadamente 66% de performance de treinamento e 70% de teste, os 81% de desempenho de validação para a melhor rede representativa dos dois poços mostraram-se válidos.

5. Conclusão

As operações de manobra são processos complexos. A movimentação da coluna de perfuração pode gerar mudanças nas pressões de fundo do poço. As pressões de *surge* ocorrem durante a descida da coluna, causando um aumento da pressão no interior do poço, já as pressões de *swab* podem ser resultantes da retirada da coluna do interior do poço, gerando uma diminuição da pressão de fundo.

O sistema coluna-poço pode ser afetado por essas alterações nas pressões de fundo do poço. Para tentar evitar problemas físicos, operacionais e de segurança, foram estudados, ao longo dos anos, diversos modelos físicos e matemáticos para previsão dos gradientes das pressões de *surge* e *swab*.

Este trabalho teve como objetivo principal a modelagem de dois poços da Petrobras. O primeiro deles, um poço-escola, localizado em Taquipe, Bahia, apresentava limitações e o número de dados para o cálculo das velocidades médias de movimentação da coluna era pequeno. Para o segundo, um poço localizado na Bacia de Santos, mais de quatro mil velocidades médias de movimentação da coluna puderam ser geradas a partir de cálculos com os dados disponíveis em uma série de arquivos.

Os valores dos gradientes de pressão de fundo durante os testes realizados no poço de Taquipe foram importantes para validação dos quatro modelos escolhidos na literatura para modelagem dos gradientes de pressão de fundo. Assim, foram gerados gráficos para comparação entre os valores experimentais e aqueles obtidos pelos modelos estudados. O modelo de Bourgoyne et al apresentou o menor erro médio, ou seja, a menor diferença, em módulo, entre os gradientes de pressão de fundo experimental e do modelo. Observou-se também que os modelos de Almeida et al e de Wang & Chukwu eram bem consolidados por exibirem erros médios aceitáveis. O modelo do fator de atrito foi o que resultou no maior erro médio. Embora o modelo de Almeida et al. considere as limitações do modelo do fator de atrito, o primeiro acrescenta às suas equações um fator de aderência. Na literatura, este parâmetro varia entre 0,45 e 0,5. Nota-se que este acréscimo possibilita um melhor ajuste ao modelo.

Após esta análise, os dados resultantes dos cálculos das velocidades médias de movimentação da coluna, bem como os parâmetros do sistema poço-coluna e as propriedades reológicas do fluido do poço da Bacia de Santos foram aplicados aos quatro modelos. Foram gerados gráficos de previsão dos gradientes de pressão de *surge* e *swab* com os resultados obtidos pelos dois poços, bem como a comparação dos modelos com os valores experimentais.

Para verificação se os ruídos, entendidos como pequenas flutuações da coluna de perfuração, poderiam afetar de maneira significativa as operações dos processos, foi realizada uma filtragem dos dados de velocidade média de movimentação da coluna. O modelo de Wang & Chukwu mostrou o melhor resultado, porém o modelo de Bourgoyne et al. também representou bem os dois poços. Os gráficos dos dois poços resultantes deste estudo foram comparados com os anteriores, sem filtro. Não se observou uma diferença relevante entre as operações com a presença e a ausência de ruídos.

A manobra é uma operação difícil de ser controlada. Muitas vezes, os estudos teóricos e experimentais encontrados na literatura podem não prever satisfatoriamente o gradiente de pressão de fundo do poço analisado. Assim, recorreu-se ao pacote computacional *Statistica* e, através da construção de um treinamento de redes neurais, buscou-se a modelagem dos poços.

Os dados dos dois poços foram reunidos e treinaram-se as mil redes e analisaram-se as cinco melhores. Os coeficientes de desempenho de treinamento, teste e validação estiveram próximos a 66, 70 e 82%, respectivamente. Estes resultados podem ser interpretados como válidos, uma vez que os dados coletados dos dois poços foram realizados de maneira bem distinta. Observa-se, assim, que as redes podem ser uma alternativa para a modelagem dos dois poços em estudo. Porém, é necessário ressaltar que as mesmas geradas não podem ser aplicadas a quaisquer outros poços e sim, somente a esses dois.

Como sugestão para próximos estudos, pode-se citar o treinamento de redes com poços que tenham propriedades físicas semelhantes, realização idêntica de coleta dos dados ou ainda arquivos oriundos da mesma fonte.

6. Referências Bibliográficas

ALMEIDA de,C.; KIMURA, F.; RAMALHO, V.; NEGRÃO, C.O.R.; JUNQUEIRA, S.L.M.; MARTINS, A.L. **Simulação do Problema de Surge e Swab em Atividades de Perfuração de Poços de Petróleo**. 2008. Rio de Janeiro, Brasil.

BING, Z., KAIJI, Z. **Dynamic model predicts well bore surge and swab pressures oil & gas journal**. v. 94, n. 53, 1996.

BOURGOYNE Jr.; MILLHEIM, K.; CHENEVER, E. **Applied drilling engineering**. Estados Unidos: Sociedade de Engenheiros de Petróleo (SPE), 1991.

BURKHARDT, A. **Wellbore Pressure Surges Produced by Pipe Movement**. SPE Drilling Engineering, v. 13, 1961.

FONTENOT, E.; CLARK, K. **An improved method for calculating swab and surge pressures and circulating pressures in a drilling well**. SPE Drilling Engineering. v. 14, n. 5, p. 451-462, 1974.

LAL, M. **Surge and Swab Modeling for Dynamic Pressures and Safe Trip Velocities**. In: IADC/SPE Drilling Conference, 1983.

LUBINSKI,A.; HSU, H.; NOITE, G. **Transiente pressure surges due to pipe movement in an oil well**. Revue de l'Institute Français du Petrole, p.307-347. May-June 1977.

MITCHELL, F. **Dynamic Surge/Swab Predictions**. SPE Drilling Engineering, v. 6, n.4, p. 325-333, set. 1988.

Neural Networks Toolbox, Demuth & Beale, The Math Works Inc., 1998.

SAMPAIO Jr., J. H. B., *Aplicativo para estimativa de surge e swab para cenários UDW/formações frágeis*, Relatório Técnico - CT TEP 0022/2002, CENPES/PETROBRAS, Tecnologia de Engenharia de Poço, Rio de Janeiro, 2002.

SOUZA Jr, M. **Redes neuronais multicamadas aplicadas a modelagem e controle de processos químicos**. 1993. Dissertação Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Programa de Engenharia Química, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro.

SOUZA Jr, M. **Treinamento de redes neurais, aplicado ao Software Statistica**, “Redes Neurais Artificiais na Engenharia Química, caps. 1 a 3. (2005)

THOMAS, E. **Fundamentos de Engenharia de Petróleo**. 2ed, pp.62-64, 2010.

WANG, Y.; CHUKWU, A. Unsteady axial laminar couette flow of power-law fluids in a concentric annulus, Industrial Engineering and Chemical Research, p 2039-2047, Vol. 35, 1996

YANG, L.; CHUKWU, A. Couette flow of non-newtonian power-law fluids in narrow eccentric annuli, Industrial Engineering and Chemical Research, p.936-942, Vol. 34, 1995.