

10º CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM PETRÓLEO E GÁS



TÍTULO DO TRABALHO:

Desenvolvimento de uma Ferramenta Computacional para Cálculos de Hidráulica de Perfuração de Poços de Petróleo

AUTORES:

Leonardo Asfora de Oliveira¹, Marcos Daniel do Nascimento Silva¹, Jose Oliveira Dantas¹
Hugo Gomes Ribeiro¹, Arthur Henrique Melo do Nascimento¹

INSTITUIÇÃO:

Diretoria Acadêmica de Indústria, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte

Desenvolvimento de uma Ferramenta Computacional para Cálculos de Hidráulica de Perfuração de Poços de Petróleo

Abstract

Drilling mud circulates through the wellbore during most of the drilling process. This dynamic component results in pressure drop and pressure gradients that must be determined, predicted and controlled to optimize drilling. In this context, a correct analysis of the drilling hydraulics is of fundamental importance, as it will influence the pressures in front of the formations, the carrying capacity of the cuttings, the required power of the surface pumps and, most importantly, the safety of the operations. In this paper, it's presented a computational tool for drilling hydraulic calculations developed by IFRN Energy Engineering students using Excel's Visual Basic for Applications (VBA) features. Based on data from drill string, drill bit, drilling mud and flow rate, the program is able to estimate, among other things, pressures along the well considering directional wells. In addition, it is also able to calculate the concentration the cutting bed formed in the lower parts of the well at high inclination sections. The developed program has intuitive and friendly interface, and is currently being used successfully as a teaching tool. Using Maurer Engineering's Hydmod3 commercial software manual, it was possible to validate the computational tool through the analysis of a case study, and the results were considered satisfactory.

Introdução

A hidráulica é um dos aspectos mais importantes durante o planejamento de uma perfuração. Isto por que o fluido de perfuração deve ser capaz de realizar três funções primárias: transportar os cascalhos a superfície, prevenir o influxo de fluidos e estabilizar as paredes do poço. Todos estes aspectos dependem de como o fluido de perfuração escoar e das pressões associadas a este escoamento (Mitchell e Miska, 2011). Uma parcela essencial da análise de hidráulica de perfuração é a determinação das pressões ao longo do poço. Durante todo o processo, estas devem se encontrar entre limites bem definidos impostos pela janela operacional, que determina a variação permitida para a pressão exercida pelo fluido de perfuração no poço, de forma a manter a integridade deste, respeitando as pressões de poros, fratura, colapso e sobrecarga (Rocha e Azevedo, 2009).

De grande importância também é a determinação da concentração do leito de cascalhos no espaço anular. Em poços verticais ou de baixa inclinação, a limpeza do poço é basicamente função da viscosidade, reologia do fluido e de sua vazão, sendo plenamente caracterizado pelo fenômeno de sedimentação. Em poços direcionais, no entanto, a inclinação possui influência significativa, e parte dos cascalhos se depositam nas partes mais baixas do poço formando uma espécie de leito (Rocha *et al.*, 2011). O controle da concentração do leito formado é de fundamental importância para impedir problemas operacionais, como por exemplo, a prisão da coluna.

Uma análise hidráulica incorreta da perfuração pode prejudicar o andamento desta operação, seja pela redução da taxa de penetração da broca, seja pela necessidade de parada da perfuração devido a ocorrência de problemas operacionais (*kicks*, colapso, fraturas, etc). Além disso, o descontrole das pressões em frente as formações põem o meio ambiente e a segurança dos trabalhadores em risco. Logo é de fundamental importância a existência de cálculos relacionados à hidráulica da perfuração, de modo a prever potenciais problemas ainda na fase de projeto do poço. Tais cálculos são complexos fazendo necessário o desenvolvimento de ferramentas computacionais para auxiliar nas análises. Este trabalho teve por objetivo desenvolver uma ferramenta computacional simplificada de hidráulica de perfuração

que permitisse estimar, para uma dada condição operacional, as pressões ao longo do poço, a concentração de cascalhos no espaço anular e a pressão requerida de bombeio.

Metodologia

A variação de pressão ao longo do poço, considerando um fluido incompressível, pode ser calculada através da equação da perda de carga (Bourgoyne et al. 1991):

$$\Delta p = \rho g \Delta PV - \frac{\rho \Delta V^2}{2} - \frac{2\rho f V^2}{D_h} \Delta PM \quad (1)$$

Onde p , ρ , g , PV , PM , V , f e D_h representam, respectivamente, a pressão, a massa específica do fluido, constante gravitacional, profundidade vertical, profundidade medida, velocidade média, fator de atrito e diâmetro hidráulica. Os termos do lado direito da igualdade representam, da esquerda para a direita, a variação devido a contribuição da hidrostática, energia cinética e perdas por atrito. Este último termo é fortemente dependente da reologia do fluido de perfuração. A ferramenta computacional desenvolvida permite ao usuário escolher o modelo reológico do fluido (Bingham ou Potência), fornecendo ainda diferentes tipos de correlação para o fator de atrito. Por simplicidade, desprezou-se as variações de energia cinética ao longo das seções e das conexões entre as tubulações, uma vez que são geralmente desprezíveis.

Já a pressão de bombeio é dada pela soma de todas as perdas de carga de subsuperfície e no sistema de circulação da sonda, Equação (2):

$$p_{bomba} = \Delta p_{atrito} + \frac{\rho q^2}{2TFA C_D^2} + \Delta p_{sup} \quad (2)$$

Onde q , TFA e C_D representam, respectivamente, a vazão de bombeio, a área total dos jatos (do inglês *Total Flow Area*) e o coeficiente de descarga (um valor de 0,95 foi utilizado). Os termos do lado direito da igualdade representam, da esquerda para direita, a soma de todas as perdas por atrito, a perda de carga nos jatos da broca e as perdas de carga nos equipamentos de superfície. Este último parâmetro foi calculado através de correlações fornecidas por Maurer Engineering (1996) para quatro tipos distintos de sonda, que seguem a seguinte formulação:

$$\Delta p_{sup} = Cq^{1.8} \quad (3)$$

Onde C é uma constante que depende do tipo de sonda utilizada. O transporte de cascalhos em poços direcionais foi modelado através do modelo mecanicista proposto por Larsen et al. (1998) para poços com inclinações maiores que 55°. Para inclinações menores, foram utilizadas as modificações na correlação original propostas por Mohammadsalehi e Malekzadeh (2011). Todos os algoritmos associados a cálculos de hidráulica foram implementados em Excel através do recurso VBA (*Visual Basic for Applications*).

A ferramenta computacional resultante possui quatro telas: Tela de Entrada, Tela Direcional, Tela da Formação e Tela da Análise. Por conveniência apenas as principais serão aqui apresentadas. A Figura 1 mostra a Tela de Entrada. As células em branco representam valores que devem ser informados pelo usuário, enquanto as células em amarelo são resultados calculados pelo programa. Nesta tela, o usuário deverá informar: especificação e comprimento das tubulações e acessórios que compõe a coluna de

perfuração, especificação do revestimento, tipo de sonda (que define os equipamentos de superfície), características da bomba utilizada, propriedades dos fluidos de perfuração e dos cascalhos.

A Figura 2 mostra a Tela Direcional. Nela, o usuário deverá informar os dados obtidos dos registros direcionais: profundidade medida (PM), inclinação e azimuth. A ferramenta computacional desenvolvida disponibiliza ao usuário cinco métodos distintos: tangente, tangente balanceada, ângulo médio, raio de curvatura e mínimo raio de curvatura (Rocha et al., 2011). Já a Figura 3 mostra a Tela de Análise. Aqui, o usuário deverá informar a vazão de bombeio e a taxa de penetração da broca. Feito isto, informações a respeito da hidráulica da bomba, da broca e perdas de atrito são calculadas. Além disto, o programa informa o regime de escoamento e a perda de carga em cada seção isolada do poço, seja no interior da coluna ou do espaço anular. Por fim, constrói gráficos de concentração de leito de cascalhos em função da inclinação e profundidade medida, além de gráficos de pressão dinâmica e hidrostática (tanto no anular como no interior da coluna de perfuração).

Figura 1: Tela de Entrada.

Coluna de perfuração						
Descrição	ESPECIFICAÇÃO	L (ft)	OD (in)	ID (in)	W (lb/ft)	L acu. (ft)
Tubos de Perfuração (Drill Pipes)	5" - 25.60 lb/ft	8400.0	5	4	25.6	8400.0
Tubos Pesados (Heavy Weights)	3 1/2" - 23.48 lb/ft	0.0	3.5	2.25	23.48	8400.0
Comandos (Drill Collars)	7 1/2" - 2 1/2"	500.0	7.5	2.5	133	8900.0
Último revestimento descido no poço		L (ft)	OD (in)	ID (in)	W (lb/ft)	
Revestimento (Casing)	11 3/4" 47.0 lb/ft	4000.0	11.75	11	47	

Acessórios					Dados da Broca	
Descrição	L (ft)	Ap (psi)	OD in	L acu. ft	Jatos nº	Diam. 1/32"
BHA	100.00	50.00	4.00	9000.0	1	12
					2	12
					3	12
					4	12
					5	12
					TFA	0.5522 in ²
					Broca	11.2 in
					Cd	0.95

Equipamentos de Superfície					
Descrição	L (ft)	ID (in)	Opção 1		
Tubo Bengala	40	3			
Mangueiras de lama	45	2			
Swivel	4	2			
Kelly	40	2 1/4			

Dados da Bomba						
Bomba	Haste	Camisa	Stroke	Eff.	Desloc.	
Tipo	Diâmetro (in)	Diâmetro (in)	Comp. (in)	Vol. (gal/stk)	Vol. (gal/stk)	
Duplex	2.00	6.00	14.00	0.98	6.34	

Cálculos de volume e comprimento das seções						
Seção nº	Dutos, etc.	L ft	OD in	ID in	Vol gal	nº Str
1	Coluna de DPs	8400.0	5	4	5483.1	864.28
2	Coluna de HWS	0.0	3.5	2.25	0	0
3	Coluna de DCs	500.0	7.5	2.5	127.49	20.096
4	BHA	100.0	4.00	-	-	-
Total					5611	884.37
Seção nº	Anulares	L ft	D _{maior} in	D _{menor} in	Vol gal	nº Str
5	Anular Rev-DP	4000.0	11	5	15666	2469.4
6	Anular Rev-HW	0.0	11	3.5	0	0
7	Anular Rev-DC	0.0	11	7.5	0	0
8	Anular Rev-BHA	0.0	11	4.00	0	0
9	Anular Poço - DP	4400.0	11.2	5	18030	2841.9
10	Anular Poço - HW	0.0	11.2	3.5	0	0
11	Anular Poço - DC	500.0	11.2	7.5	1411.4	222.47
12	Anular Poço - BHA	100.0	11.2	4.00	446.48	70.377
Total					35553	5604.1

Fluido de Perfuração			
Leitura do viscosímetro		θ ₃₀₀	θ ₅₀₀
		42	72
☒ Bingham ☐ Potência		VP (cp)	LE (lb/100ft ²)
Parâmetros reológicos		30.00	12.000
Massa específica		13 lbm/gal	
Correlações para fator de atrito			
Colebrook			
Blaussius			
Swamee e Jain			
Transporte de Cascalhos			
Diâmetro Médio (D ₅₀)		0.25 in	
Massa específica		21.6 lbm/gal	
Correlação:		1 - Larsen et al.	

Tão importante quanto desenvolver uma ferramenta computacional é sua validação frente a resultados disponíveis na literatura e/ou outros softwares comerciais. Neste artigo, a segunda opção foi escolhida, onde realizou-se um estudo de caso utilizando o software HYDMOD3, da Maurer Engineering. Os dados utilizados para o estudo de caso foram retirados de Maurer Engineering (1996). O estudo de caso diz respeito a um poço horizontal, sendo perfurado por uma coluna de perfuração composta por tubos

10º CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM PETRÓLEO E GÁS

de perfuração (DPs) e comandos (DCs), possuindo também um acessório compondo o BHA (*Bottom Hole Assembly*) cuja perda de carga é especificada. Os principais dados relativos ao estudo de caso analisado estão dispostos na Tabela 1:

Tabela 1: Dados utilizados para o estudo de caso.

Parâmetro	Especificação
Equipamentos de superfície	Tubo bengala: 40ft ; ID = 3"
	Mangueiras: 45ft ; ID = 2"
	Swível: 4 ft; ID = 2"
	Kelly: 40ft ; ID = 2 ¼"
Coluna de perfuração	DPs: OD = 5"; ID = 3,5"; L = 8400 ft.
	DCs: OD = 3,5"; ID = 2,25"; L = 500 ft
	BHA: OD = 4"; L = 100ft; $\Delta p = 50$ psi
	Broca: 11.2"; TFA = 0,55 in ²
Revestimento	ID = 11" ; L = 4000 ft
Fluido de perfuração	$\rho = 13$ ppg; VP = 30 cp; LE = 12 lbf/100ft ²
Cascalhos	D ₅₀ : 0.25" ; $\rho = 21.6$ ppg.
Vazão	420 gpm

O perfil direcional utilizado para o poço é o mesmo que está representando na Figura 2, onde estão informados a profundidade medida (PM), inclinação e azimuth do poço. Neste estudo de caso, o método do mínimo raio de curvatura foi utilizado para construir a trajetória do poço.

Figura 2: Tela Direcional.

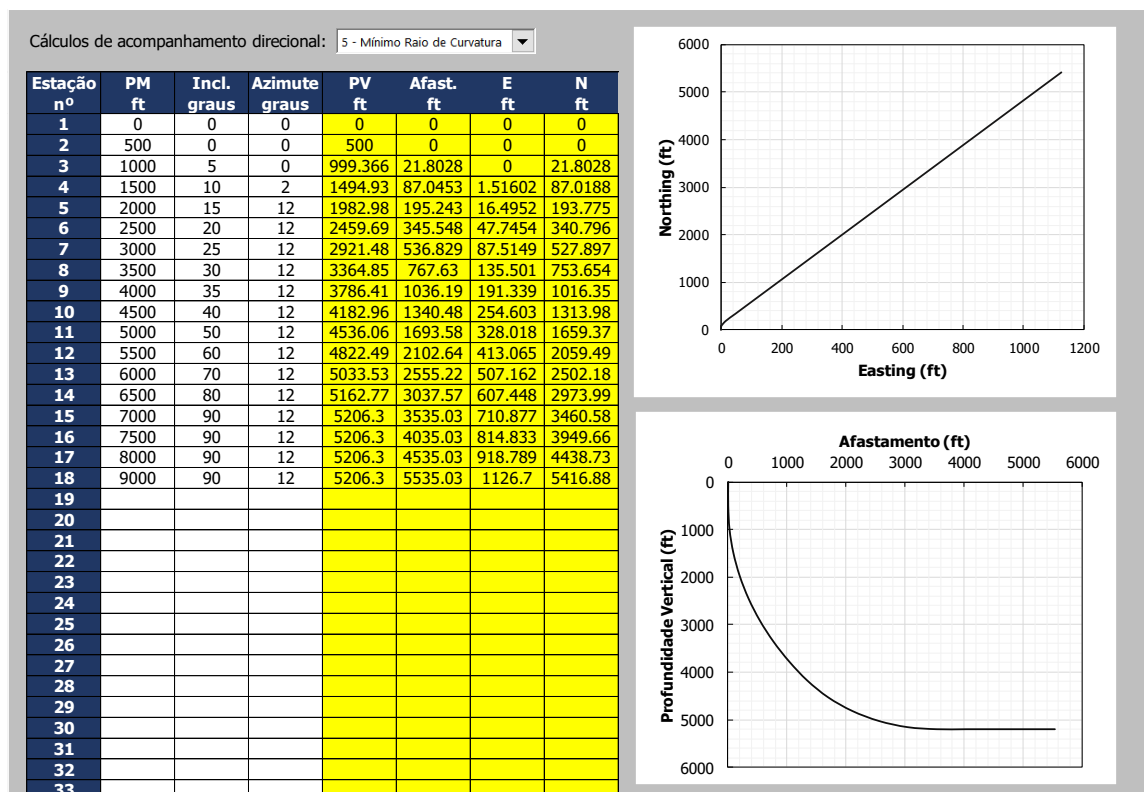
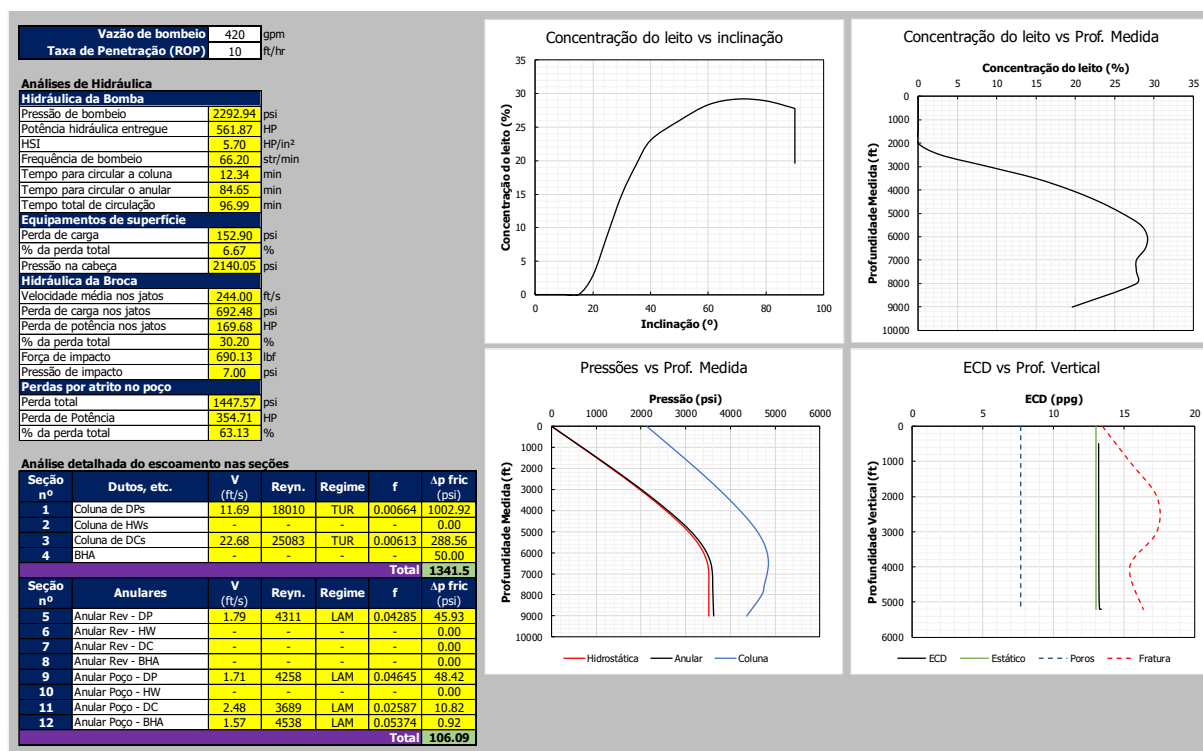


Figura 3: Tela de Análise.



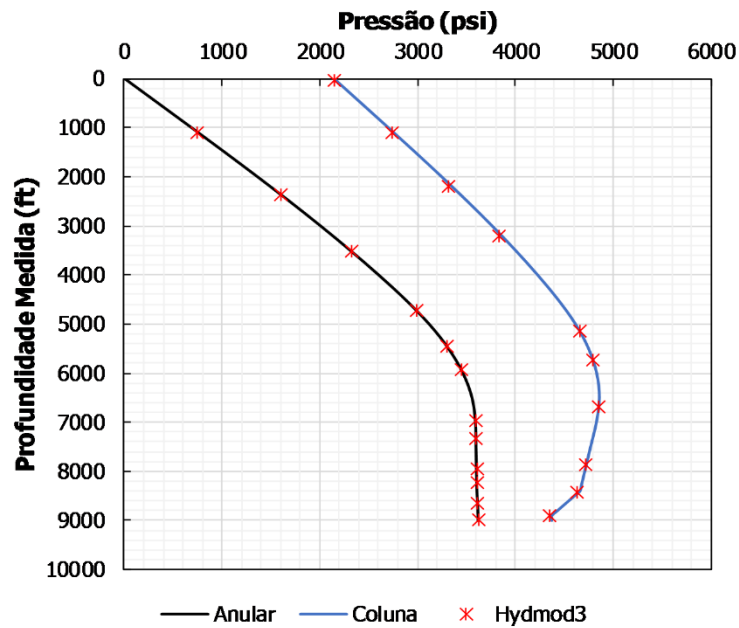
Resultados e Discussões

A Figura 4 mostra o perfil de pressão no poço pelo interior da coluna de perfuração e pelo interior do espaço anular, comparando com os resultados do HYDMOD3, onde é possível notar uma excelente concordância dos resultados. Os dados relativos ao HYDMOD3 foram retirados de tabelas presentes no próprio manual. No entanto, apenas quatro pontos estavam disponíveis para a curva de pressão na coluna, de tal forma que os demais foram extraídos dos gráficos presentes no manual através da ferramenta de digitalização de pontos GSYS, versão 2.4.7.

Analisando a Figura 4, percebe-se que a pressão no espaço anular cresce aproximadamente de maneira linear e depois permanece aproximadamente constante. Este comportamento deve-se ao fato de as perdas de carga por atrito serem pequenas no anular para o caso estudado (devido a elevados valores de diâmetro hidráulico) fazendo com que o perfil de pressão dinâmico se aproxima do caso hidrostático. De fato, para profundidades medidas maiores que cerca de 7000ft, o poço é horizontal e a pressão torna-se aproximadamente constante, já que não há variação da pressão hidrostática.

Já o perfil de pressão no interior da coluna cresce de aproximadamente linear, atinge um valor máximo em cerca de 6700 ft e começa a decrescer. Este comportamento deve-se as elevadas perdas por atrito no interior dos *drill pipes* e dos *drill collars*. À medida que a inclinação do poço aumenta, a contribuição da pressão hidrostática diminui e a perda por atrito passa a preponderar, acarretando em uma redução de pressão. À exatamente 9000ft, a diferença entre as pressões no interior da coluna e no anular representa a perda de carga nos jatos da broca.

Figura 4: Comparativo dos perfis de pressão no anular e na coluna de produção.



A Tabela 2 mostra o comparativo de alguns outros parâmetros operacionais, indicando o erro (calculado através da Equação (4)) encontrado entre os valores obtidos pela ferramenta computacional e o software Hydmod3.

$$Erro = \left| \frac{Valor_{ferramenta} - Valor_{Hydmod3}}{Valor_{Hydmod3}} \right| \quad (4)$$

Novamente, uma excelente concordância é observada, com um erro máximo de 0,6928% para a perda por atrito no anular. Este maior erro encontrado para a perda de carga no anular pode ser explicado pelo fato de que o HYDMOD3 permite variações para o diâmetro do poço, enquanto a ferramenta computacional desenvolvida não. Logo, enquanto este primeiro utilizou para os cálculos valores distintos de diâmetros de poço para diferentes valores de profundidade medida, este último utilizou um valor de diâmetro fixo e igual ao da broca.

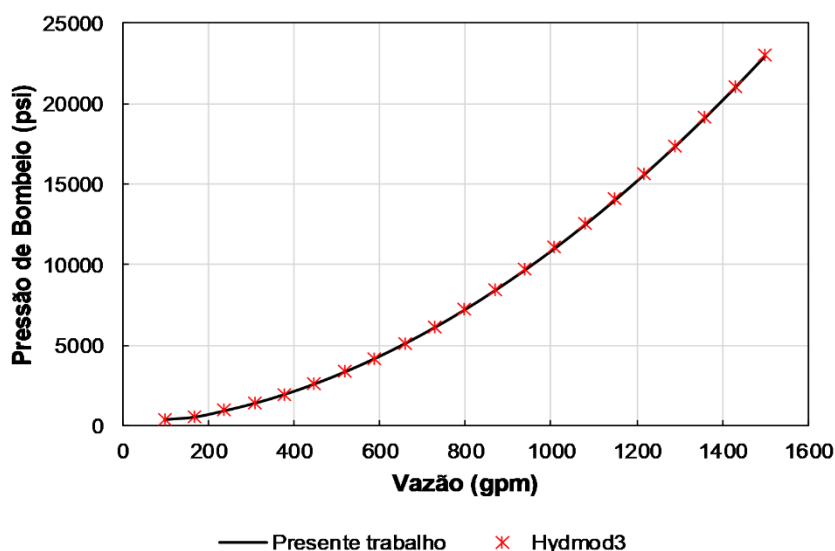
Tabela 2: Comparativo da pressão de bombeio e perdas de carga.

Parâmetro	Presente trabalho	Hydmod3	Erro (%)
p_{bomba}	2292,94	2293,6	0,0288
Δp_{jatos}	692,48	692,47	0,0014
Δp_{atrito} nos drill pipes	1002,92	1004,01	0,1086
Δp_{atrito} nos comandos	288,56	288,87	0,1074
Δp_{atrito} total no anular	106,09	105,36	0,6928

Por fim, a Figura 5 mostra o resultado de uma análise de sensibilidade da pressão de bombeio à vazão. Novamente, uma ótima concordância é observada, confirmando a eficácia da ferramenta computacional

desenvolvida no cálculo de pressões no poço. Infelizmente, não foi possível realizar comparativos entre os valores obtidos para a concentração de cascalho no anular, uma vez que o HYDMOD3 não possui metodologias de cálculo deste parâmetro para poços direcionais.

Figura 5: Comparativo da pressão de bombeio para vários valores de vazão.



Conclusões

Uma ferramenta computacional para cálculos de hidráulica de perfuração foi desenvolvida em Excel utilizando recursos do *Visual Basic for Applications* (VBA). Um estudo de caso utilizando o software HYDMOD3 da *Maurer Engineering* foi utilizado para validação. O comparativo realizado mostrou excelente concordância para o perfil de pressão no interior da coluna de perfuração e no espaço anular, além do comportamento da pressão de bombeio com a vazão. Desta forma, o programa desenvolvido se apresenta como uma interessante ferramenta de ensino, não somente por possuir interface simples e amigável, mas por fornecer resultados consistentes com softwares comerciais.

Referências Bibliográficas

- BOURGOYNE, A. T. *et al.* **Applied drilling engineering**. Society of Petroleum Engineers, 1991. 508p.
- LARSEN, T. I; PILEHVARI, A. A; AZAR, J. J. Development of a new cutting-transport model for high-angle wellbores including horizontal wells. **SPE Drilling & Completion**, paper SPE 15177, v. 4, n.3, 1989.
- MAURER ENGINEERING Inc. **Wellbore Hydraulics Model (Hydmod3): Theory and user's manual**. Houston, Texas, 1996.
- MITCHELL, R. F.; MISKA, Z. S. **Fundamentals of drilling engineering**. Society of Petroleum Engineers, 2011. 710p.
- MOHAMMADSALEHI, M; MALEKZADEH, N. Optimization of Hole Cleaning and Cutting Removal in Vertical, Deviated and Horizontal Wells. In: SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference Exhibition, 2011, Jarkarta, Indonesia. Paper SPE 143675.
- ROCHA, L. A. S. *et al.* **Perfuração direcional**. 3 ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2011. 342p.
- ROCHA, L. A. S.; AZEVEDO, C. T. **Projeto de poços de petróleo: geopressões e assentamento de colunas de revestimento**. 2 ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2009. 562p.