

MODELAGEM DO *FLOWMETER* PARA ESTIMATIVA DA VAZÃO DE FLUIDOS

Márcio Roberto de A. Araújo Filho (1); Edilson Ponciano de Lima (2); Sebastião Henrique Camilo da Silva (3); Wellington dos Santos de Araújo (4); Ernesto Vargas Bautista (5)

Centro Universitário Tiradentes-UNIT/AL, e-mail: marcioraaf@hotmail.com (1)

Centro Universitário Tiradentes-UNIT/AL, e-mail: edilsonponciano@yahoo.com (2)

Centro Universitário Tiradentes-UNIT/AL, e-mail: henrique.dps@hotmail.com (3)

Centro Universitário Tiradentes-UNIT/AL, e-mail: wellingtonaraujo_engpet@hotmail.com (4)

Centro Universitário Tiradentes-UNIT/AL, e-mail: ernesto.vargas.br@hotmail.com (5)

Resumo: A ferramenta de perfilagem de produção (*Production Logging Tool* - PLT) é aplicada na produção e injeção de poços. Esta ferramenta é constituída por vários dispositivos. Um deles é chamado *Continuous Flowmeter*. Este equipamento é responsável por monitorar as taxas de fluxo em cada zona produtora ou injetora. O objetivo deste trabalho foi desenvolver um protótipo do *Flowmeter* e medir uma relação entre potencial elétrico, rotações por minuto (RPM) e vazão com ar e água. Os resultados mostraram que o potencial elétrico e as RPM são proporcionais à taxa de fluxo. Isso significa que, quanto maior é o potencial elétrico e a rotação, maior é a taxa de fluxo. Portanto, com o modelo físico do *Flowmeter*, foi possível encontrar a relação entre os três parâmetros descritos, a fim de prever e calcular as taxas de fluxo.

Palavras-chave: *Continuous Flowmeter*, vazão, potencial elétrico.

Introdução

O *Continuous Flowmeter* é um perfil de poço revestido que tem como objetivo monitorar as taxas de fluxo de fluido no poço. Este perfil consiste basicamente de uma ou mais hélices centralizadas, cuja velocidade de rotação é registrada continuamente dentro do poço. A rotação da (s) hélice (s) é função da velocidade de fluxo do fluido proveniente da zona produtora, da velocidade e do sentido de movimentação do cabo, descendo ou subindo, e da viscosidade dos fluidos. (Thomas, 2001)

Se a velocidade relativa entre a ferramenta e o fluido produzido fosse igual à zero, não haveria movimento relativo entre eles e, portanto, a velocidade do cabo seria a própria velocidade do fluido. Como seria bastante trabalhoso ou até não operacional ficar alterando a velocidade do cabo em cada trecho de interesse para se encontrar a rotação da hélice igual à zero, é muito mais simples se efetuar três manobras de descida e subida, com velocidades diferentes do cabo entre cada

manobra, e plotá-los em um gráfico da rotação da hélice (RPS) em função da velocidade do cabo (V_{cabo}). Traçando-se uma reta pelos pontos obtidos, pode-se extrapolar e encontrar a velocidade do cabo que resultaria em rotação zero para cada trecho de interesse.

A partir das velocidades de fluxo nos trechos de interesse, ou seja, entre os canhoneados abertos, determina-se, por diferença, a contribuição percentual de cada intervalo. Dessa forma, dependendo do modelo, o perfil *flowmeter* fornece medições de velocidade de fluido precisas, em situações complexas de completações e regimes de escoamento, e oferece flexibilidade para monitorar poços com diferentes ranges de velocidade. A **Figura 1** apresenta uma seção mecânica do *flowmeter*, com o desenho das suas hélices, sendo aplicado de acordo com suas especificações quanto à pressão, temperatura, diâmetro, comprimento, peso, pontos do sensor, máxima velocidade do fluido e características do material (resistente à corrosão, por exemplo).

Figura 1: Seção mecânica (hélices) do *Continuous Flowmeter* da Empresa Halliburton.

(Fonte: Halliburton, *wireline & perforating*, 2014).



O propósito deste estudo é entender o princípio básico de funcionamento do *Flowmeter* e desenvolver um modelo físico utilizando a modelagem icônica, encontrar a relação entre a rotação da hélice por minuto e do potencial elétrico

utilizando como fluido o ar, determinar a vazão por meio de um canal hidráulico através de um vertedouro e medir a voltagem, estabelecer uma constante da ferramenta para estimar a vazão a diferentes voltagens.

Para isto foi realizado dois testes, o primeiro usando ar para observar a relação entre a rotação da hélice *versus* a voltagem e, o segundo usando água para observar a relação entre a voltagem *versus* a vazão.

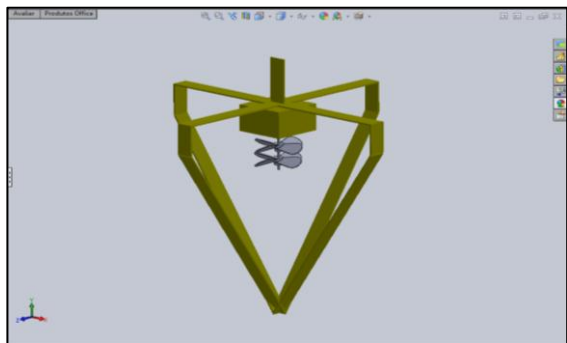
Os resultados mostraram que o potencial elétrico e a rotação por minuto (RPM) são proporcionais a vazão, ou seja, quanto maior o potencial elétrico e o RPM, maior será a vazão, podendo assim estimar a passagem do fluido no reservatório. Portanto, a principal contribuição deste trabalho foi encontrar a relação entre a rotação da hélice, voltagem e vazão baseada na prototipagem da ferramenta do *flowmeter*.

Metodologia

1. Modelagem da Ferramenta

A modelagem do *flowmeter* foi baseada no *Continuous Flowmeter Spinners* da Empresa GE Oil & Gas e o desenho, considerando as falhas na montagem e funcionamento, foi realizado no programa *Solidworks*, conforme **Figura 2**.

Figura 2: Desenho técnico do *Flowmeter*.



A **Tabela 1** apresenta os materiais usados, os custos e as especificações. O Centro Universitário Tiradentes (UNIT) forneceu parte dos materiais.

Tabela 1: Materiais e Especificações para montagem do *Flowmeter*.

Materiais	Custo (R\$)	Especificação
Hastes de ferro	10,00	1,5 cm x 02 mm
01 Motor de Corrente Contínua (DC)	10,00	-
02 Hélices	UNIT	Diâmetro 7,5 cm
01 Multímetro	UNIT	-
02 Imãs	-	-
01 <i>Reed switch</i>	5,50	-
01 Arduino	Emprestado	-
01 <i>Protoboard</i>	UNIT	-
01 Tinta <i>spray</i> dourada metálica	16,50	-
01 Vertedor Parede Delgada	UNIT	15 cm

Inicialmente, as hastes de ferro foram montadas simulando as hélices da ferramenta, onde foram anexadas a um motor de corrente contínua. Também foi feito um modelo de proteção para a hélice utilizando as hastes de ferro, sendo pintada com uma tinta dourada metálica. Dois imãs foram inseridos na hélice em abas alternadas. Como o perfil de avaliação do poço é um sensor elétrico, foi necessário montar um circuito elétrico. Para isso, utilizou-se o sistema *Reed Switch* e *Protoboard* junto com o Arduino 1.6.6 (ver **Figura 3**), onde para que cada vez que a hélice girasse o imã fechasse o contato com o *reed switch* e mandasse um sinal para o programa Arduino 1.6.6. Nele, as rotações por minuto (RPM) ou rotação da hélice (RPS) são contabilizadas.

Figura 3: *Protoboard* conectado ao Arduino

1.6.6.

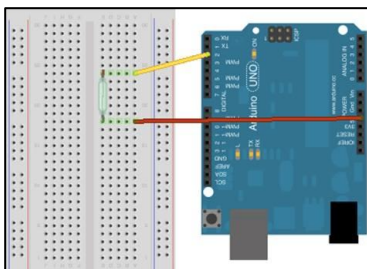


Figura 4: Modelo Icônico do *Flowmeter*



A **Figura 4** apresenta o resultado final do modelo icônico do *flowmeter* para realização dos testes experimentais.

2. Testes Experimentais

Dois testes com o *flowmeter* foram realizados para obter a relação entre a rotação da hélice por minuto e do potencial elétrico, logo após calibrar e medir a vazão. O primeiro teste foi utilizado como fluido o ar. Utilizando o *protoboard* e *reed switch* foi contabilizada as rotações por minuto (RPM), usando o programa Arduino 1.6.6, conforme citado anteriormente; e o multímetro que contabilizou a tensão elétrica. A tensão em termos técnicos é a “diferença de potencial elétrico entre dois pontos”, medido em volts (Carlos E & Morimoto, 2009). Quanto mais volts, mais energia pode fluir.

No segundo teste foi utilizado como fluido à água em um canal hidráulico (**Figura 5**), onde foi obtida a tensão elétrica através do multímetro anexado ao *flowmeter*.

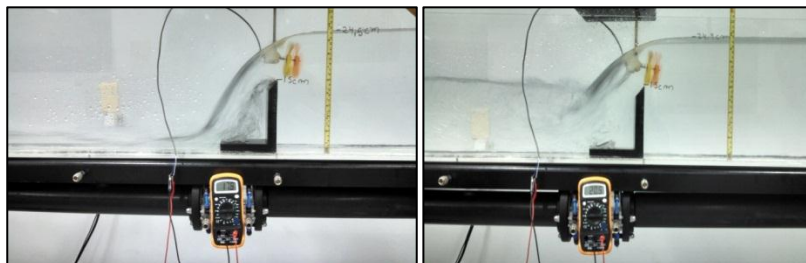
Figura 5: Canal Hidráulico utilizado nos testes de medição das vazões com o *Flowmeter*.



O canal hidráulico é um equipamento desenvolvido especialmente para apoiar o ensino das matérias que tratam dos fluidos e seus escoamentos assim como para apresentar os fenômenos reais em forma visual o que torna mais fácil o entendimento dos fenômenos hidráulicos. O objetivo do canal foi simular a chegada dos fluidos do reservatório até o fundo do poço e realizar a medição das vazões, através da ferramenta. Para isto, o *flowmeter* foi colocado no meio do canal hidráulico com um vertedor de parede delgada, conforme **Figura 6**. Observa-se que o *flowmeter* foi colocado acima do topo do vertedor que tem uma altura de 15 cm a partir da base do canal (*datum*). Seguidamente, após ligar a bomba, espera-se que o fluxo, ao longo do canal, estabilize. Isto pode

ser acompanhado com a leitura do multímetro. Após observar a estabilização, é realizada a medição de altura do líquido a montante do vertedor.

Figura 6: Calibração do *Flowmeter*.



Os dados obtidos foram analisados com base na fórmula do vertedor retangular de parede delgada e sem contrações (Fernandez *et al.*,2005), ver **Equação 1**, para obtenção da vazão:

$$Q = 1,84 \times L \times H^{\frac{3}{2}} \quad (\text{Equação 01})$$

Na qual: 1,84 é a constante utilizada para o vertedor tipo parede delgada; L é a largura do canal hidráulico em metros; H é a diferença da altura do vertedor com a lâmina d'água medida também em metros. A unidade da vazão resulta em litro por segundo (L/s)

A **Tabela 2** mostra os dados obtidos no canal hidráulico.

Tabela 2: Dados obtidos do canal hidráulico (Tensão, H e L).

Vertedor de Parede Delgada	
L (m)	H (m)
0,1	0,095
0,1	0,099

Resultados e discussões

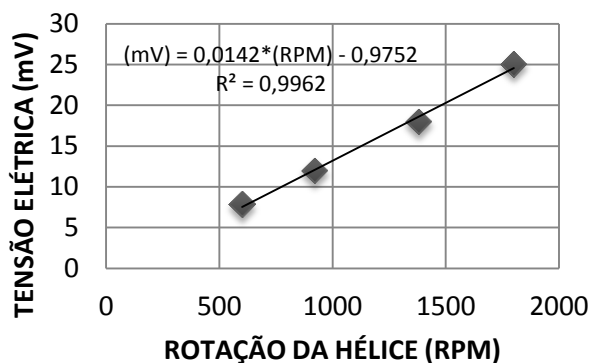
1. Teste com Ar

Os resultados do primeiro teste podem ser observados no **Gráfico 1**. Este apresenta a tensão elétrica em função da rotação por minuto (RPM) das hélices do *flowmeter* para o teste com ar. Observa-se que existe uma boa linearidade e proporcionalidade dos dados obtidos, ou seja, maior RPM da hélice, maior a tensão elétrica medida em milivolts (mV). Portanto, acredita-se que esta relação é válida para qualquer outro fluido que possa ser usado no *flowmeter*.

Observa-se também na **Figura 1** que a equação da linha de tendência é confiável já que, quando a rotação da hélice for zero, a tensão elétrica fica próximo de zero (-0,9752). Na realidade, se não existir rotação na hélice, a tensão é zero. Portanto, com o intuito de calibrar (corrigir) a equação da curva, foi

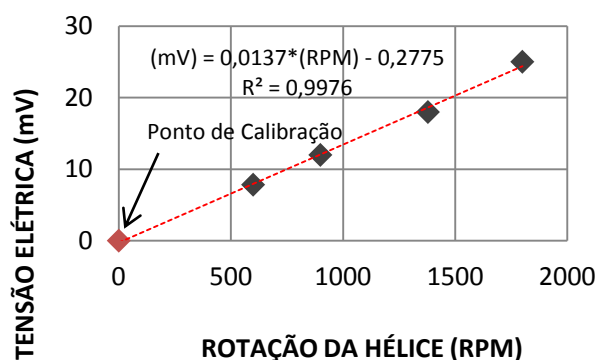
adicionado um quinto dado, ou seja, rotação zero para tensão zero como se mostra na **Figura 2**.

Gráfico 01: Rotação da hélice em função da Tensão Elétrica utilizando ar.



Observa-se também na **Figura 2** que o coeficiente de Pearson (R^2) melhora e para rotação zero, a tensão fica ainda mais próxima de zero (-0,2775). O valor da pendente da curva calibrada (0,0137) indica que 1 (uma) rotação da hélice que acontece em um minuto, provoca um potencial elétrico de 0,0137 mV.

Gráfico 02: Rotação da hélice em função da Tensão Elétrica – Curva Calibrada.



Uma limitação do primeiro teste foi estimar ou calcular a vazão do ar a partir dos dados obtidos (RPM e voltagem) de uma equação que esteja em função do tipo de fluido, tipo de hélice, RPM e tensão.

2. Teste com Água

No segundo teste, os resultados obtidos no canal hidráulico estão apresentados na **Tabela 3**. Observa-se que quanto maior é a tensão medida, igualmente, maior é a vazão calculada. Portanto, existe também uma direta proporcionalidade entre estes dois parâmetros assim como observado no primeiro teste entre o RPM e a tensão. Isto é, quanto maior é a rotação da hélice, maior é a tensão e conseqüentemente maior é a vazão que escoava através do *flowmeter*.

Com os dados da **Tabela 3** se obteve uma constante, relacionando a vazão e a tensão elétrica. Observa-se que as constantes de proporcionalidade não foram iguais apesar de serem próximas. Isto indica que a linearidade existe, mas precisa ser calibrada.

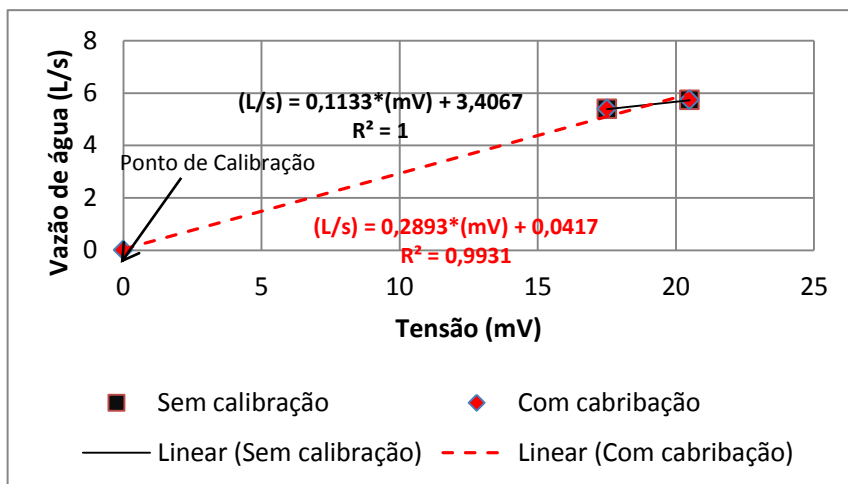
Tabela 3: Resultados obtidos através da calibração.

Tensão (mV)	Q (L/s)	Q / V (L.mV/s)
17,50	5,39	0,31
20,50	5,73	0,28
Média		0,29

Plotando os dados de vazão e tensão da **Tabela 3**, observa-se na **Figura 3** que a equação da reta (cor preta) precisa ser calibrada já que, se o potencial elétrico medido fosse zero, a vazão seria de 3,4 L/s. Isto fisicamente não teria sentido já que quando a tensão é zero, é porque não acontece rotação na hélice, ou seja, não existe fluxo sobre a hélice do *flowmeter*. Portanto, esta condição foi adicionada como terceiro ponto para obter a calibração da curva da vazão versus a tensão. Observa-se na mesma Figura 3 que a equação da curva calibrada apesar de ter um menor valor do R^2 mostra que quando a tensão for zero, a vazão fica em um valor muito próximo de zero (0,0417 L/s). O interessante é que a inclinação da curva coincida muito bem com a constante (relação da vazão/tensão) calculada na **Tabela 3**.

Na tabela, o valor da constante oscila entre 0,28 a 0,31 L.mV/s e a inclinação da curva calibrada no valor de 0,2893 L.mV/s, próximo ou igual ao valor médio da constante calculada na **Tabela 3**. Portanto, a equação da curva calibrada é confiável para prever a vazão de água que flui pela hélice do *flowmeter*. A inclinação desta curva indica que por cada (um) litro que flui sobre a hélice da ferramenta, é gerado um potencial de 0,29 mV num segundo.

Figura 03: Dados de vazão versus tensão e linearidade dos dados sem e com calibração.



Uma limitação do segundo teste foi obter mais dados de vazão e tensão no canal hidráulico. Está limitação foi dada por ter disponível um único vertedor e a dificuldade de variar

a altura do líquido em relação ao topo do vertedor.

Os resultados mostraram que o potencial elétrico e a rotação por minuto (RPM) são proporcionais a vazão, ou seja, quanto maior o potencial elétrico e o RPM, maior será a vazão, podendo assim estimar a passagem do fluido no reservatório. Portanto, a modelagem do *flowmeter* para estimativa da vazão de

fluidos nos permitiu chegar a vazões para diferentes potenciais elétricos, possibilitando estimar as vazões em um mesmo poço. O perfil *flowmeter* corrido isoladamente, sem outras informações, somente pode informar a contribuição de cada intervalo, se o fluxo for com um único fluido, conforme testes realizados com ar e água. Caso esteja presente a produção de dois fluidos, mais um perfil é necessário para informar, além da contribuição de cada intervalo, qual a percentagem de cada fluido.

Conclusões

A modelagem da ferramenta permitiu entender o princípio básico de funcionamento desse perfil de produção, o *flowmeter*. Testes para determinação da vazão de fluidos foram realizados, onde foi observado que o potencial elétrico e o RPM são proporcionais à vazão, ou seja, quanto maior o potencial elétrico e o RPM, maior será a vazão. Além disso, após a calibração da ferramenta foi possível estimar a passagem do fluido no reservatório, atingindo o objetivo da ferramenta de medir a vazão total de produção (ou de injeção). E por fim através da ferramenta foi possível encontrar a relação entre a rotação da hélice, voltagem e vazão. A calibração das curvas obtidas foi importante para dar maior confiabilidade no cálculo de valores preditivos no *flowmeter*.

Agradecimentos

Primeiramente a Deus, aos nossos pais e ao Centro Universitário Tiradentes de Alagoas – UNIT/AL pela infraestrutura dos Laboratórios Multidisciplinar de Fenômenos de Transporte e de Engenharia Mecatrônica. A coordenação do curso de engenharia de petróleo na pessoa da professora Jaqueline da Guia, a professora Vanessa Limeira pela contribuição no trabalho.

Referências

Fernandez, M. F., Araujo, R., Ito, A. E., Netto, A. “*Manual de Hidráulica*”. Editora Edgard Blucher Ltda. Capítulo 6 – Vertedores, 2005.

Paz, E. F., “*Sistema baseado em medidor de pressão diferencial para determinação em linha de vazões de produção em poços de petróleo*”, Dissertação Universidade de São Paulo, 2010.

Thomas, J.E., “*Fundamentos de Engenharia de Petróleo*”. 2ª Edição. Editora Interciência. Disponível em: <www.halliburton.com>, 2001. (Acesso em Junho de 2018).

Carlos, E. Morimoto, “*Entendendo a eletricidade: tensão, corrente, watts e outros bichos*”, Disponível em: <<http://www.hardware.com.br/dicas/entendendo-eletricidade.html>> (Acesso em Junho de 2018).