

CONEM 2016
CONGRESSO NACIONAL DE
ENGENHARIA MECÂNICA

21-25
AGOSTO DE 2016
FORTALEZA - CEARÁ

EFEITOS DO DIÂMETRO E DA RUGOSIDADE DA TUBULAÇÃO NAS PERDAS DE CARGA E NO CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA DOS SISTEMAS DE BOMBEAMENTO DE ÁGUA

Cleomar Maraga, cleomar.maraga@gmail.com¹

Douglas Chesini, doch.gmo@gmail.com¹

Alexandre José Bühler, alexandre.buhler@farroupilha.ifrs.edu.br¹

¹Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul, Câmpus Farroupilha. Av. São Vicente, 785, Bairro Cinquentenário, CEP: 95180-000, Farroupilha/RS

Resumo: *Sistemas de bombeamento são utilizados para uma gama muito grande de serviços e suas aplicações requerem que os mesmos trabalhem por grandes períodos de tempo. O intenso uso desses sistemas acarreta em um elevado consumo energético, o que implica em maiores custos para o funcionamento do sistema, além de uma probabilidade de manutenções em intervalos de tempo menores do que o esperado. Desse modo, é muito importante levar em conta detalhes como o diâmetro da tubulação, sua rugosidade, e possíveis efeitos que ocorrem ao longo do tempo. Dessa forma o projeto pode ser elaborado de forma a minimizar os custos com energia elétrica ao longo dos anos de operação, mas ainda atendendo a mesma demanda. O objetivo do trabalho é quantificar a influência da rugosidade das paredes internas dos dutos e do diâmetro da tubulação no consumo elétrico, uma vez que esses são dois fatores de grande relevância no cálculo da energia elétrica necessária pelo sistema para fazer o bombeamento. Através de um sistema hipotético de bombeamento de água, foi possível levantar ambas as perdas de carga contínua e localizadas de um sistema com tubulações de diferentes diâmetros e rugosidades. Utilizando-se das mesmas, foi possível relacionar o consumo de energia elétrica do sistema com o diâmetro e a rugosidade da tubulação e então concluir que a utilização de um diâmetro de 15 cm pode reduzir em até 14% o consumo elétrico quando comparada a um diâmetro de 7 cm. A rugosidade, variável que aumenta de dimensão devido ao tempo de utilização da tubulação, mostrou-se outro fator de grande influência no consumo. Para tubulações com 7 cm de diâmetro, por exemplo, um sistema com dez anos de atividade consome 10% mais energia elétrica quando comparado com um sistema com tubulações novas. Dessa forma, é importante a utilização de tubulações com rugosidade e taxa de degradação baixas, além da minimização do número de componentes à fim de garantir uma economia a longo prazo.*

Palavras-chave: *Sistemas de Bombeamento, Perda de Carga, Consumo, Rugosidade, Diâmetro de Tubulação.*

1. INTRODUÇÃO

O consumo de energia elétrica é um dos fatores de maior relevância no que diz respeito à redução de custos em qualquer operação industrial. De fato, o consumo de energia elétrica não está somente associado a assuntos econômicos, mas também a assuntos ambientais, uma vez que a produção de energia elétrica pode estar associada com emissão de poluentes.

Hoje grande parte do controle de vazão dos sistemas de bombeamento se utiliza do método tradicional de controle através de válvulas e registros com o intuito de limitar o fluxo do fluido, diminuindo ou aumentando assim a vazão no sistema. Porém, esse método de controle de vazão é o que apresenta mais perdas e, consequentemente, menor eficiência energética nos sistemas de bombeamento, Bridi (2013). Em compensação, o controle de velocidade da bomba (através do uso de inversores de frequência), segundo Polesi (2010), diminui consideravelmente o consumo de energia elétrica. Outro fator que gera diminuição na eficiência elétrica em sistemas de bombeamento é o superdimensionamento de bombas hidráulicas por acúmulos indevidos de fatores de segurança, Filho *et al.* (2010).

Para garantir que os sistemas trabalhem com a mesma potência, mas com uma redução do consumo de energia, é importante que não haja perdas de pressão significativas na tubulação entre a bomba e o destino final do líquido. Sabe-se que o atrito com a parede ao longo dos dutos bem como variações na direção do líquido causadas por cotovelos e curvas, assim como o uso de diversos tipos de válvulas causam certa resistência ao escoamento. Para satisfazer essas

perdas, as bombas elétricas utilizadas no escoamento de líquidos incompressíveis devem trabalhar numa potência mais elevada, fato que aumenta o consumo de energia e pode elevar significativamente os custos do processo.

Fatores como o rendimento da bomba, do motor e de todo o sistema de tubulações são também variáveis que necessitam ser analisadas a fim de reduzir o consumo de energia elétrica com respeito à operação dos sistemas de bombeamento.

Utilizando como base um modelo de um sistema de bombeamento de água predefinido, o artigo em questão traz uma análise do aumento do consumo de energia elétrica devido às perdas de carga nos dutos do sistema analisado. Assim sendo, o trabalho visa demonstrar onde se deve atuar para aumentar a eficiência energética dos sistemas de bombeamento através da minimização de ambas as perdas contínuas e localizadas para um sistema de bombeamento de água.

Este artigo está assim dividido: a seção II apresenta uma revisão dos conceitos envolvidos com relação às perdas de carga, bem como a instrumentação matemática utilizada nos cálculos da mesma. Na seção III é apresentado o sistema de bombeamento e toda a sistemática utilizada para encontrar a perda de carga total e o consumo de energia elétrica da bomba utilizada no escoamento do sistema. Na seção IV são apresentadas as discussões sobre os resultados obtidos e uma análise da eficiência energética do sistema analisado. Por fim, a seção V apresenta as considerações finais.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Em sistemas hidráulicos reais existe a ocorrência de perdas de carga. Essas perdas podem ser de duas naturezas distintas, as perdas contínuas e as perdas localizadas.

Perdas contínuas ocorrem devido a fricção do líquido em movimento com as paredes dos dutos circulares e pode ser calculada usando-se a Eq. (1), conhecida formalmente como equação de Darcy-Weisbach, Hidro Didática (2014),

$$\Delta H_{pc} = f \frac{L v^2}{2 D g} \quad (1)$$

onde ΔH_{pc} é a perda contínua de carga, dada em metros, f é o coeficiente de atrito entre o líquido e as paredes da tubulação, L é a distância do duto, dada em metros, v é a velocidade média do líquido, em metros por segundo, D é o diâmetro interno do duto, em metros, g é a aceleração da gravidade, com valor de 9,81 metros por segundo ao quadrado.

O único fator da Eq. (1) cuja obtenção necessita uma base matemática mais profunda é o coeficiente de atrito, pois essa variável depende do regime de escoamento. Em dutos com escoamento laminar, ou seja, com um número de Reynolds menor ou igual a 2300, o fator de atrito pode ser calculado com a Eq. (2), enquanto que para escoamentos turbulentos o fator de atrito pode ser determinado pela equação de Colebrook e White, Swaffield *et al.* (1983), representada na Eq. (3).

$$f = \frac{64}{Re} \quad (2)$$

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left(\frac{\varepsilon/D}{3,71} + \frac{2,51}{Re \sqrt{f}} \right) \quad (3)$$

Como pode ser notado, a Eq. (3) deve ser resolvida através de um processo iterativo, o que significa que para iniciar-se os cálculos, uma estimativa de fator de atrito deve ser feita. A Eq. (4) pode ser usada para determinar esse valor inicial, onde, ε é a rugosidade da tubulação e Re é o número de Reynolds do escoamento.

$$f_o = 0,25 \left[\log \left(\frac{\varepsilon/D}{3,71} + \frac{2,51}{Re^{0,9}} \right) \right]^{-2} \quad (4)$$

Embora não seja fácil determinar valores precisos para a rugosidade da tubulação, segundo Henderson (1966), erros expressivos nessa variável geram erros pequenos em f devido a natureza logarítmica das Eq. (3) e (4).

Além da perda de carga contínua que ocorre em qualquer tubulação, nota-se a presença de uma perda de carga correlacionada a descontinuidades intencionais na tubulação, como por exemplo, curvas, cotovelos, juntas, válvulas, etc. Essas perdas de cargas podem ser calculadas por dois métodos distintos. O método direto baseia-se na soma algébrica dos coeficientes de perda localizada em cada componente, e cada tipo de componente da tubulação possui um diferente coeficiente de perda localizada, comumente representado pela letra K . Já o segundo método para se calcular a perda localizada é o Método dos Comprimentos Equivalentes, onde a perda de carga é dada pela Eq. (5).

$$\Delta H_{PL} = f \frac{Le v^2}{2 D g} \quad (5)$$

A Eq. (5) é muito semelhante ao método de cálculo da perda de carga contínua (Equação de Darcy-Weisbach), porém relacionando a perda de carga com um comprimento equivalente, Le , dado em metros. Essa variável representa a

distância, em metros, que o componente equivaleria em um sistema caso esse componente não existisse. Naturalmente, cada tipo de componente apresenta um comprimento equivalente diferente, com valores tabelados.

Tendo-se calculado a perda de carga contínua e a perda de carga localizada é possível então determinar a perda de carga total do sistema pela Eq. (6).

$$\Delta H_P = \Delta H_{pc} + \Delta H_{PL} \quad (6)$$

A perda de carga total (ΔH_P), componente da altura manométrica, H , deve ser relacionada com a potência P da bomba à fim de se calcular a energia elétrica gasta pela bomba em um determinado período de tempo. Essas duas variáveis são relacionadas entre si pela Eq. (7)

$$P = \frac{H Q g \rho}{\eta} \quad (7)$$

onde: Q é a vazão de fluido na tubulação, em m^3/s , g é a aceleração da gravidade ($9,81 m/s^2$), ρ é a densidade do fluido usado na sistema de bombeamento, em kg/m^3 , η é o rendimento da bomba hidráulica, e H é a altura manométrica, em metros.

A altura manométrica representa a altura na qual o fluido deve ser levantado somado à queda de pressão devido a ação do atrito dos dutos e dos dispositivos auxiliares do sistema (perda de carga total).

Nos sistemas de escoamento, a movimentação do fluido é produzida por forças que se desenvolvem na própria massa líquida do mesmo, através da utilização de bombas hidráulicas. Essas forças se devem à utilização de um motor equipado com uma certa quantidade de “pás” especiais utilizadas para forçar o fluido (aplicando-lhe pressão) para uma direção específica. Esse rotor é conhecido como impelidor. A distinção entre os vários tipos de bombas hidráulicas se deve à maneira que a energia é cedida ao líquido e da orientação de saída do fluido do rotor, Bridi (2013). Este artigo dará ênfase na utilização de bombas centrífugas, que são as mais empregadas nos sistemas de bombeamento de líquidos. Esse tipo de bomba aplica inicialmente ao fluido energia do tipo cinética devido à rotação do impelidor e posteriormente, energia de pressão.

A rotação do impelidor se utiliza da energia mecânica gerada pelo eixo de um motor elétrico. É necessária uma quantidade específica de potência mecânica no rotor para que o fluido seja bombeado pelo sistema, de acordo com a Eq. (7). O motor, que por sua vez possui uma potência elétrica específica, é alimentado por energia elétrica. A relação entre a potência mecânica de saída entregue pelo eixo e a potência elétrica de entrada do motor é conhecida como rendimento do motor, na Eq. (8) e possui um valor que é especificado na tabela do fabricante.

$$\eta = \frac{P_{mecânica}}{P_{elétrica}} \quad (8)$$

Desse modo, o consumo de energia elétrica, de acordo com a Eq. (9) está diretamente atrelado à potência elétrica, e por sua vez, ao rendimento e à potência mecânica demandada.

$$Consumo = P_{elétrica} \cdot tempo \quad (9)$$

3. MATERIAIS E MÉTODOS

O sistema de bombeamento hidráulico sobre o qual é conduzida toda a análise sobre as perdas de carga e eficiência energética é apresentado na Fig. 1. O sistema em questão representa um sistema típico de bombeamento de água de um poço tubular profundo (comumente conhecido como poço artesiano). A água é bombeada para um reservatório localizado em uma altura específica, utilizando-se para tal, uma motobomba submersível ou simplesmente bomba submersa.

Essas bombas possuem o motor, de forma alongada, acoplado diretamente ao conjunto, que fica imerso no poço. O conjunto fica suspenso pela tubulação de recalque (que o sustenta) constituída de dutos de aço galvanizado com diâmetro, D , de 7 centímetros. A instalação possui aproximadamente 10 anos de uso, de modo que a rugosidade, ϵ , da tubulação é 0,0046.

O rendimento hidráulico da bomba é de 75%. O motor, por sua vez, é um motor de indução trifásico de alta potência com rendimento de 91%, e com poucas variações de suas características de acordo com o torque demandado.

Como é possível observar na Fig. 1, o sistema possui cinco conexões do tipo cotovelo com raio médio, uma conexão do tipo Tê com passagem direta e uma válvula do tipo globo que se encontra naturalmente aberta. O sistema possui uma vazão de 18 m^3/h e a bomba permanece ligada durante 140 horas/mês para que sejam atendidas as necessidades de demanda no reservatório.

O rendimento hidráulico da bomba é de 75%. O motor, por sua vez, é um motor de indução trifásico de alta potência com rendimento de 91%, e com poucas variações de suas características de acordo com o torque demandado.

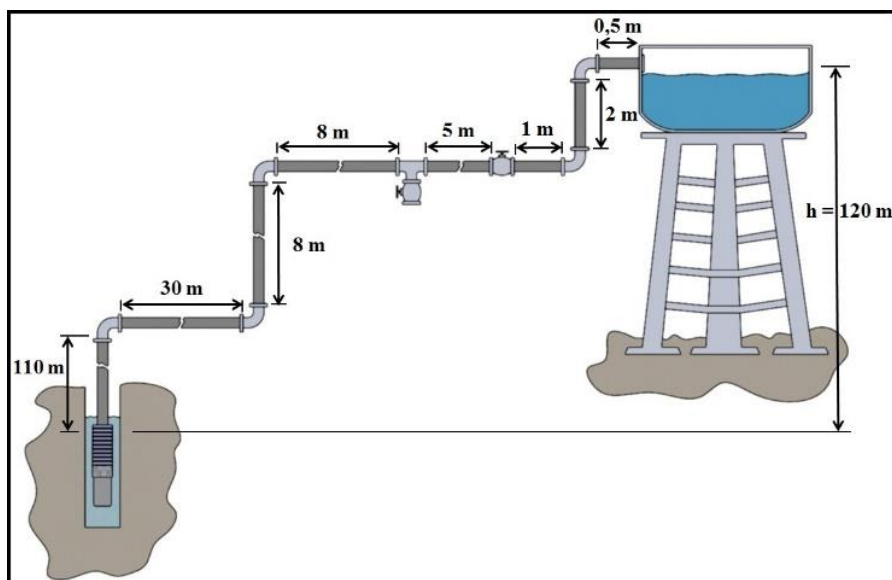


Figura 1 - Sistema de bombeamento estudado

Como é possível observar na Fig. 1, o sistema possui cinco conexões do tipo cotovelo com raio médio, uma conexão do tipo Tê com passagem direta e uma válvula do tipo globo que se encontra naturalmente aberta. O sistema possui uma vazão de $18 \text{ m}^3/\text{h}$ e a bomba permanece ligada durante 140 horas/mês para que sejam atendidas as necessidades de demanda no reservatório.

Utilizando-se das equações descritas na seção 2, os cálculos para obtenção do consumo energético do sistema, para às condições descritas, foram conduzidos fazendo o uso de uma planilha eletrônica.

Nas condições acima citadas, e sabendo que o líquido incompressível bombeado é a água, o escoamento é turbulento uma vez que seu coeficiente Reynolds é superior à 2300. Desse modo, a obtenção do coeficiente de atrito entre o líquido e as paredes da tubulação (f) foi encontrado utilizando as Eq. (4) e (3), com uma boa aproximação para o valor de f na 5ª iteração.

Uma vez que o coeficiente de atrito foi determinado, as perdas de carga contínua (ΔH_{pc}) e perdas de carga localizadas (ΔH_{pL}) puderam ser obtidas considerando o comprimento real (contínuo) da tubulação e o comprimento equivalente dos componentes, como mostrado na Fig. 2. Para o cálculo do comprimento equivalente dos componentes da tubulação, é necessário fazer o uso da Tab. 1, a qual possui comprimentos padrões para cada componente de acordo com seu respectivo diâmetro.

A mesma metodologia foi conduzida considerando diferentes diâmetros de tubulação. Os resultados obtidos para a perda de carga total dos sistemas (ΔH_p) para os diferentes diâmetros analisados, encontram-se dispostos na Tab. 2.

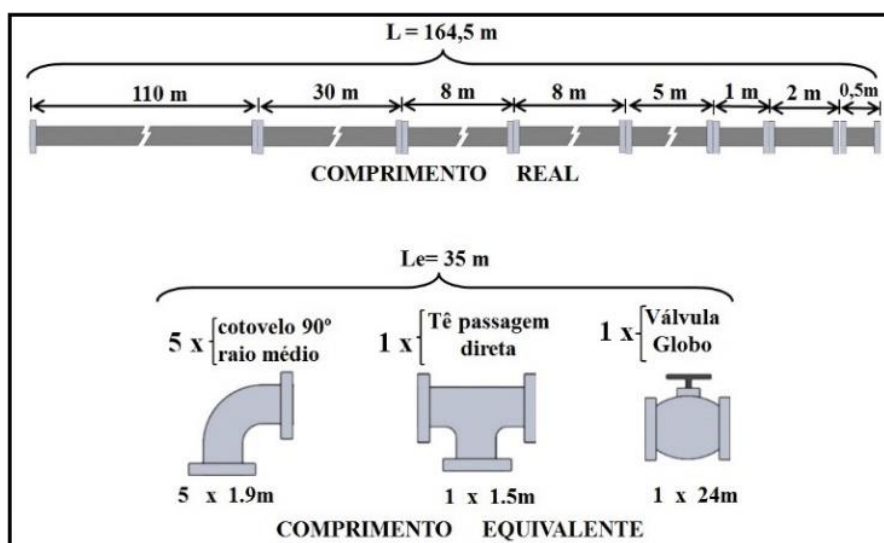


Figura 2 - Comprimento real e equivalente do sistema para um diâmetro de 0.07m

Tabela 1. Comprimento equivalente de válvulas e conexões tubo de aço (m), Lengsfeld et al, 2005

DIÂMETRO D		COTOVELO 90° RAIO LONGO	COTOVELO 90° RAIO MÉDIO	COTOVELO 90° RAIO CURTO	COTOVELO 45°	CURVA 90° R/D - 1 1/2	CURVA 90° R/D - 1	CURVA 45°	REGISTRO DE GAVETA ABERTO	REGISTRO DE GLOBO ABERTO	REGISTRO DE ÂNGULO ABERTO	TÊ PASSAGEM DIRETA	TÊ SAÍDA DE LADO	TÊ SAÍDA BILATERAL
mm	pol.													
13	½	0,3	0,4	0,5	0,2	0,2	0,3	0,2	0,1	4,9	2,6	0,3	1,0	1,0
19	¾	0,4	0,6	0,7	0,3	0,3	0,4	0,2	0,1	6,7	3,6	0,4	1,4	1,4
25	1	0,5	0,7	0,8	0,4	0,3	0,5	0,2	0,2	8,2	4,6	0,5	1,7	1,7
32	1 ¼	0,7	0,9	1,1	0,5	0,4	0,6	0,3	0,2	11,3	5,6	0,7	2,3	2,3
38	1 ½	0,9	1,1	1,3	0,6	0,5	0,7	0,3	0,3	13,4	6,7	0,9	2,8	2,8
50	2	1,1	1,4	1,7	0,8	0,6	0,9	0,4	0,4	17,4	8,5	1,1	3,5	3,5
63	2 ½	1,3	1,7	2,0	0,9	0,8	1,0	0,5	0,4	21,0	10,0	1,3	4,3	4,3
75	3	1,6	2,1	2,5	1,2	1,0	1,3	0,6	0,5	26,0	13,0	1,6	5,2	5,2
100	4	2,1	2,8	3,4	1,3	1,3	1,6	0,7	0,7	34,0	17,0	2,1	6,7	6,7
125	5	2,7	3,7	4,2	1,9	1,6	2,1	0,9	0,9	43,0	21,0	2,7	8,4	8,4
150	6	3,4	4,3	4,9	2,3	1,9	2,5	1,1	1,1	51,0	26,0	3,4	10,0	10,0
200	8	4,3	5,5	6,4	3,0	2,4	3,3	1,5	1,4	67,0	34,0	4,3	13,0	13,0
250	10	5,5	6,7	7,9	3,8	3,0	4,1	1,8	1,7	85,0	43,0	5,5	16,0	16,0
300	12	6,1	7,9	9,5	4,6	3,6	4,8	2,2	2,1	102,0	51,0	6,1	19,0	19,0
350	14	7,3	9,5	10,5	5,3	4,4	5,4	2,5	2,4	120,0	60,0	7,3	22,0	22,0

Tabela 2. Perdas de carga obtidas para uma tubulação de 10 anos para diferentes valores de diâmetro.

D (m)	Re	f	Le (m)	ΔH_{pc} (m)	ΔH_{pl} (m)	ΔH_p (m)
0.070	90945.68	0.0816	35	16.52	3.51	20.03
0.075	84882.64	0.079	38.1	11.31	2.62	13.93
0.100	63661.98	0.0691	50.1	2.35	0.72	3.07
0.125	50929.58	0.0628	62.4	0.70	0.27	0.96
0.150	42441.32	0.0583	75.9	0.26	0.12	0.38

Sabendo que,

- $\eta_{bomba} = 75\%$
- $\eta_{motor} = 91\%$
- tempo de operação = 140 h/mês

e fazendo o uso das Eq. (7) a (9) bem como das perdas totais de carga (ΔH_p) para todos os diâmetros analisados, a potência elétrica demandada da rede foi levantada. O tempo de operação, por sua vez, foi levantado levando em conta a demanda média do reservatório para abastecer um sistema de lavagem com múltiplas estações. Os resultados obtidos estão dispostos na Tab. 3:

Tabela 3 - Cálculo de consumo mensal para o sistema de bombeamento.

D (m)	Hp (m)	H tot. (m)	Pb (kW)	Pe (kW)	Consumo (kWh)
0.070	20.03	140.03	9.16	10.06	1408.51
0.075	13.93	133.93	8.76	9.63	1347.56
0.100	3.07	123.07	8.05	8.84	1238.23
0.125	0.96	120.96	7.91	8.69	1217.09
0.150	0.38	120.38	7.87	8.65	1211.22

Ambas as Tab. 2 e 3 apresentam resultados considerando uma rugosidade do duto (ε) de 0,0046, uma vez que a tubulação é relativamente velha. Caso toda a instalação de recalque fosse substituída por dutos novos de aço galvanizado, a rugosidade do duto seria de aproximadamente 0,00017. A mesma metodologia de cálculo foi realizada considerando o novo valor de rugosidade. Os resultados obtidos estão expostos na Tab. 4 e Tab. 5.

Tabela 4. Cálculo da perda de carga total para uma tubulação nova para diversos valores de diâmetro.

D (m)	Re	f	Le (m)	ΔH_{pc} (m)	ΔH_{pl} (m)	ΔH_p (m)
0.070	90945.68	0.0262	35	5.32	1.13	6.45
0.075	84882.64	0.0260	38.1	3.73	0.86	4.59
0.100	63661.98	0.0251	50.1	0.86	0.26	1.12
0.125	50929.58	0.0249	62.4	0.28	0.11	0.38
0.150	42441.32	0.0249	75.9	0.11	0.05	0.16

Tabela 5. Cálculo do consumo e custo mensal para uma tubulação nova para diâmetros variados.

D (m)	H_p (m)	$H_{tot.}$ (m)	P_b (W)	P_e (W)	Consumo (kWh)
0.070	6.45	126.45	8.27	9.09	1272.25
0.075	4.59	124.59	8.15	8.95	1253.55
0.100	1.12	121.12	7.92	8.70	1218.62
0.125	0.38	120.38	7.87	8.65	1211.23
0.150	0.16	120.16	7.86	8.64	1209.02

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Observando os dados para o consumo, gerados pela atribuição dos valores de diâmetros diferentes, pôde-se então estudar a sua relação com o consumo de energia elétrica. Como é possível de se notar pelas Tab. 3 e 4 expostas na Seção 3, um diâmetro superior da tubulação faz com que o consumo seja menor. Isso se deve à redução das perdas de carga nas paredes e componentes da tubulação em diâmetros maiores, como pode ser observado através da Fig. 3.

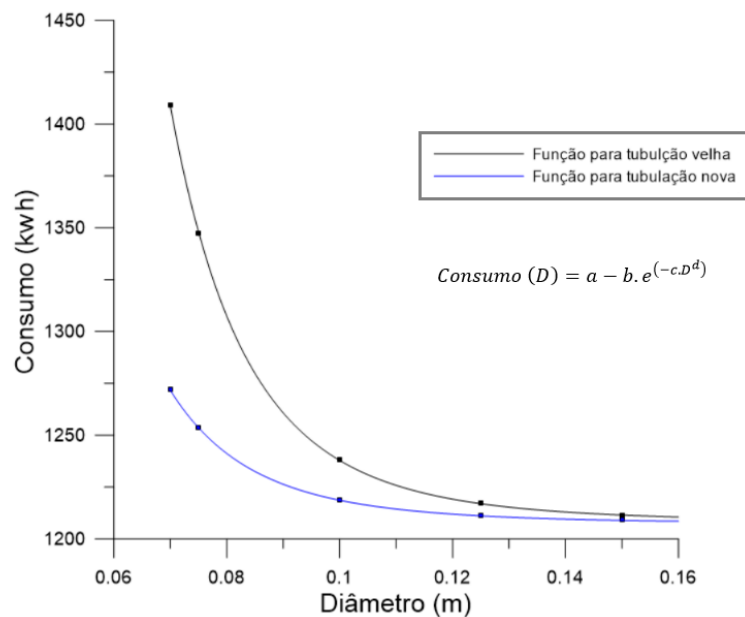


Figura 3 – Relação entre as variáveis diâmetro e consumo para tubulações novas e velhas de aço galvanizado.

4.1. Perdas de carga e consumo energético

Uma vez que a localização do poço tubular profundo e do reservatório de água são definidos, o comprimento L da tubulação é constante e não pode ser modificado. A vazão do sistema também é mantida constante. Assim, a perda de carga contínua é influenciada somente pelo diâmetro da tubulação e pela rugosidade das paredes internas da mesma.

De forma similar, já que a tubulação do sistema de bombeamento analisado é definida, os componentes (joelhos, registros, entre outros) bem como o número de componentes necessários, não sofre alterações. Assim, como a vazão do sistema também necessita ser mantida constante, a perda de carga localizada também é influenciada somente pelo diâmetro dos componentes e pela rugosidade das paredes internas dos mesmos.

O aumento do diâmetro da tubulação faz com que o comprimento equivalente (Le) dos componentes seja maior, como observado na Tab. 1. Porém, equitativamente ao que acontece com as perdas de carga contínuas, ambos o fator de atrito com as paredes da tubulação (f) e a velocidade do escoamento (v) sofrem uma redução. Isso faz com que o valor calculado para a variável (ΔH_{PL}) seja menor a medida que o diâmetro da tubulação aumenta.

Como visto, para sistemas fixos e com vazões definidas, somente a rugosidade das paredes internas da tubulação, bem como seu diâmetro influenciam nas perdas de carga do sistema. Consequentemente, uma vez que a perda de carga é diretamente proporcional à potência elétrica demandada pela bomba, ambos os valores de rugosidade e diâmetro da tubulação são os fatores de escopo para a análise do consumo de energia elétrica do sistema de bombeamento.

4.2. Influência do diâmetro e rugosidade no consumo de energia elétrica

A rugosidade das paredes internas dos tubos usados no recalque do sistema analisado possui uma influência diretamente proporcional a perda de carga contínua. Essa variável, por sua vez, influencia diretamente no aumento de potência elétrica demandada pela bomba e consequentemente, no aumento do consumo de energia elétrica.

Ao comparar os resultados obtidos com os diferentes valores de rugosidade - referentes a tubulações de aço galvanizado com diferentes idades - como exposto na Fig. 3, pode-se perceber como essa variável pode influenciar na eficiência energética do sistema de bombeamento.

Para ambas rugosidades pôde-se relacionar as curvas geradas pelos pontos obtidos com um modelo de Weibull com quatro parâmetros, como mostrado da Eq. (10), onde o consumo está em função do diâmetro, D .

$$\text{Consumo}(D) = a - b \cdot e^{(-c \cdot D^d)} \quad (10)$$

Para uma rugosidade de 0.00017 (tubulação nova), a curva de consumo de energia elétrica da bomba com relação ao diâmetro da tubulação segue uma característica da distribuição de Weibull com um coeficiente de determinação (r^2) de 0.999852, o que representa uma correlação muito precisa entre os cinco pontos e a equação. Os seguintes parâmetros foram utilizados para a obtenção da curva:

- $a = 1734,07$ kWh;
- $b = 526,59$ kWh;
- $c = 1,9 \times 10^{-7} \text{ m}^{-1}$;
- $d = -5,05$.

Para esse valor de rugosidade, a redução do consumo com o aumento do diâmetro do tubo é considerável. Ou seja, para tubulações novas, o consumo da bomba em uma tubulação com diâmetro de 7 cm é de aproximadamente 1272.25 kWh. Já com um diâmetro de 15 cm o consumo cai para aproximadamente 1209.02 kWh, gerando então uma redução de 5% no consumo elétrico mensal do sistema de bombeamento em questão.

Já para uma rugosidade de 0.0046, referente a uma tubulação de 10 anos, a curva que relaciona o consumo de energia elétrica da bomba com o diâmetro da tubulação pode ser expressada por um modelo de Weibull com um coeficiente de determinação (r^2) de 0.999985, e com os seguintes parâmetros:

- $a = 2866.62$ kWh;
- $b = 1658.27$ kWh;
- $c = 5 \times 10^{-8} \text{ m}^{-1}$;
- $d = -5.52$.

A redução do consumo elétrico com o aumento do diâmetro do tubo é significativa. Como observado no gráfico, mostrado na Fig. 4, para tubulações velhas, o consumo da bomba para dutos com diâmetro de 7 cm é de aproximadamente 1408.93 kWh. Já para um diâmetro de 15 cm o consumo fica aproximadamente 1211.22 kWh, o que representa uma diminuição de mais de 14% no consumo de energia elétrica para o sistema de bombeamento em questão.

A Fig. 4 mostra o gráfico da diferença de custo que se obtém quando se substitui uma tubulação de 7 cm para uma outra com outros diâmetros. Os valores obtidos são para diferentes valores de rugosidade, referentes a diferença de idade entre as tubulações.

A diferença de consumo da bomba com o aumento do diâmetro, quando passada para o custo com energia elétrica reflete numa economia considerável. Assim, para uma tubulação com diâmetro de 15cm, a economia chega a 63,22 kWh mensais para uma tubulação nova e numa economia de 197,70 kWh mensais no caso de uma tubulação com 10

anos de atividade. Isso representa uma redução do custo anual de 758,67 kWh para tubulações com $\varepsilon = 0,00017$ e de quase 2372,43 kWh para tubulações com $\varepsilon = 0,0046$.

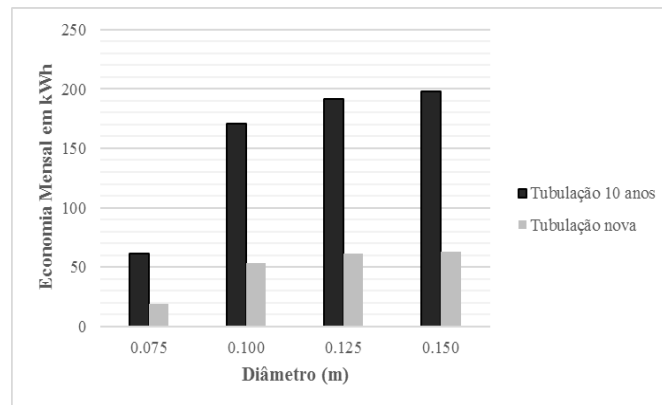


Figura 4: Economia no custo da energia elétrica com o aumento da tubulação.

Outro fenômeno interessante notado ao se fazer essa comparação, é a diferença no consumo de energia elétrica para o mesmo diâmetro, mas em tubulações com diferentes idades. Ao se tomar como exemplo dutos com 7 cm de diâmetro, tem-se que uma tubulação nova (rugosidade de 0.00017) consome quase 10% menos energia elétrica que uma tubulação velha (rugosidade de 0.0046). Essa diferença é expressiva, já que um mesmo sistema de abastecimento poderá consumir um adicional mensal de aproximadamente 136,68 kWh após 10 anos de atividade, como mostrado na Fig. 5, onde se tem a economia mensal entre as tubulações de diferentes idades.

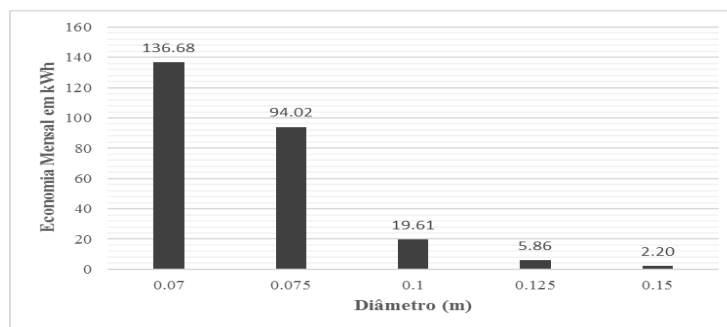


Figura 5: Economia mensal, de uma tubulação nova sobre uma tubulação velha

Essa diferença é menos considerável com o aumento dos diâmetros. De fato, para uma tubulação com $D = 15$ cm, a diferença entre o consumo no primeiro ano para o décimo é insignificante. Isso acontece devido ao fato de em diâmetros maiores as perdas de carga são reduzidas e exercem uma influência pouco significativa no aumento do consumo de energia elétrica.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A escolha do material do duto, o diâmetro das tubulações e a quantidade de componentes são três fatores de grande relevância na determinação do consumo elétrico de um sistema de bombeamento.

No que tange a escolha do material, para tubos comuns feitos de aço galvanizados, a diferença no consumo pode chegar a ser 10% menor para uma tubulação nova quando comparados valores de uma tubulação de dez anos. Tendo em vista que sistemas de poços de perfuração profunda tem uma vida útil elevada, essa diferença ao ser acumulada ao longo do tempo se torna significativa. Nesse sentido é importante a escolha de materiais que possuam rugosidade inicial baixa e taxa de degradação baixa, já que é essa a propriedade que vai garantir uma economia a longo prazo.

A respeito dos diâmetros das tubulações, pôde-se determinar a sua influência na economia do sistema de bombeamento. Essa economia é de mais que 14% quando utilizada uma tubulação com 15cm de diâmetro ao invés de uma tubulação com 7 cm de diâmetro, considerando para ambas uma tubulação de dez anos. No décimo ano de atividade de uma tubulação de aço galvanizado, essa diferença de consumo geraria uma economia de mais de mil reais. Ressalta-se que essa economia seria ainda maior para os anos subsequentes, onde a degradação do material da tubulação incidirá em um aumento da rugosidade dos dutos.

Finalmente, é importante ressaltar que o diâmetro elevado acarretará em um aumento dos comprimentos equivalentes de componentes como válvulas e conexões, o que influencia no aumento da perda de carga. Por isso é importante manter-se um equilíbrio entre os valores de diâmetro e de comprimento equivalente. Outra maneira de se

reduzir os comprimentos equivalentes e garantir que a perda de carga localizada se minimize, é avaliar a diminuição de válvulas e conexões, ou sua substituição por componentes com menor comprimento equivalente, além da substituição de cotovelos de raio médio por cotovelos ou curvas mais suaves.

6. REFERÊNCIAS

- Bridi, A.B., 2013, “Avaliação do consumo energético de vazão em sistema de bombeamento utilizando válvulas mecânicas e inversores de frequência - experiências laboratoriais e estudo de caso”, Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Edificações e Ambiental, Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá.
- Polese, E.L., 2010, “Eficiência energética em sistemas de bombeamento: uso do variador de frequência”. Trabalho de Diplomação (Graduação em Engenharia Civil) - Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- Filho, D.O., Ribeiro, M.C., Mantovani, E.C., Soares, A.A., Fernandes, H.C., 2010, “Dimensionamento de motores para bombeamento de água”. Universidade Federal de Viçosa, Jaboticabal.
- Hidro Didática, 2014, “Manual de Instruções Técnicas e Didáticas”, Canoas.
- Swaffield, J.A., Bridge, S., 1983, “Applicability of the Colebrook-White Formula to Represent Frictional Losses in Partially Filled Unsteady Pipeflow”. Brunel University, Middlesex.
- Henderson, F.M., 1966, “Open Channel Flow”. MacMillan. New York.

7. RESPONSABILIDADE AUTORAL

“Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho”.

EFFECTS OF PIPE DIAMETER AND ROUGHNESS ON HEAD LOSS AND ELECTRICAL ENERGY CONSUMPTION OF WATER PUMPING SYSTEMS

Cleomar Maraga, cleomar.maraga@gmail.com¹

Douglas Chesini, doch.gmo@gmail.com¹

Alexandre José Bühler, alexandre.buhler@farroupilha.ifrs.edu.br¹

¹Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul, Câmpus Farroupilha. Av. São Vicente, 785, Bairro Cinquentenário, CEP: 95180-000, Farroupilha/RS

Abstract. *Pumping systems are widely used for a large range of services and their applications require them to work for long periods of time. The intense use of these systems leads to a substantial increase in electrical consumption, which results in higher costs to keep the system functioning, in addition to a higher probability of maintenance in shorter periods of time. Therefore, it is of great importance taking notice of parameters such as, the pipe diameter, its roughness, and other effects that may appear during the utilization. The project was developed aiming the minimization of electrical energy costs, keeping the same demand from the reservoir. The objective of the paper is to quantify the influence of inner pipe roughness and pipe diameter in the electrical consumption, once that these are two components of large relevance in the calculation of the energy required to pump the water through the system. Using a hypothetical water pumping system, it was possible to identify both continuous and local head loss in a system with different diameters and roughness coefficients. Applying these parameters, it was possible to relate the electrical energy consumption with the pipe diameter and roughness, concluding that using a 15 cm diameter may reduce by 14% the consumption when compared to a 7 cm diameter. The roughness, parameter that increases according to the time which the pipe is used, revealed to be another factor of great influence in the consumption. In 7 cm diameter pipes, a 10-year-old pipe system consumes 10% more electrical energy when compared to a new system. Thus, one may conclude that it is important the use of inner surfaces that have low roughness coefficients and degradation rates, in addition to a pipe system with fewer components in order to ensure a long term economy.*

Keywords: *Pumping Systems, Head Loss, Consumption, Roughness, Pipe Diameter*