

## Modelagem de um Tanque de Escorva para Bomba em Sistema de Descarte de Óleo

### Modeling of a Priming Tank for Pump in a System of Oil Disposal

Flávia Schwarz Franceschini Zinani, Lucas Adamy

fzinani@unisinos.br, lucas.adamy1988@gmail.com

Universidade do Vale do Rio dos Sinos – UNISINOS, Av. Unisinos 950, 93022-000 São Leopoldo RS, Brasil

#### Resumo

Neste trabalho, objetivou-se avaliar e criar um modelo matemático para um sistema de escorva de uma bomba centrífuga, utilizada para transportar óleo de um tanque de armazenamento até a linha de produção. Bettini (2007) propôs uma equação para validação de um tanque de escorva, utilizando água em testes realizados em laboratório. O presente trabalho avalia um sistema similar, porém utilizando óleo, onde as constantes obstruções da válvula de pé, localizada no alinhamento antigo de sucção da bomba, motivaram a substituição da mesma por um sistema com tanque de escorva, localizado a montante da bomba. Foi criado um modelo matemático para o sistema baseado na equação da energia mecânica e na Lei de Boyle para modelar o tanque de escorva. Os resultados obtidos com o modelo foram validados através da comparação com o sistema real em operação, apresentando excelente concordância. As faixas de volume útil do tanque de escorva, bem como a sua faixa de variação durante a operação do sistema, foram muito próximas às calculadas. A eficiência do sistema ao longo do tempo também ficou comprovada, pois considerando um ano após a modificação não foram necessárias intervenções de manutenção no sistema versus as cinco manutenções necessárias ao ano anterior a modificação.

**Palavras-chave:** Bomba centrífuga, tanque de escorva, Lei de Boyle.

#### Abstract

This study aimed to evaluate and create a mathematical model for a priming system of a centrifugal pump, used to transport oil from a storage tank to the production line. Bettini (2007) proposes an equation for validation of a priming tank using water in laboratory tests. The present work is a similar system, but using oil, where the common obstructions of a foot valve, located at the old alignment of pump suction, led to the replacement of that valve by a priming tank system, located upstream the pump. A mathematical model based on the mechanical energy equation and Boyle's law to model the priming tank was created. The results obtained with the model have been validated by comparing with the real system operation, showing excellent agreement. The useful volume ranges of the priming tank, as well as its range of variation during system operation, were very close to those calculated. The efficiency of the system over time was also proven, considering one year after the modification maintenance interventions were not necessary in the system versus the five maintenances required in the year prior to the modification.

**Keywords:** Centrifugal pump, priming tank, Boyle's Law.

## **Introdução**

Uma característica geral das bombas centrífugas é a necessidade de escorva do sistema antes do início da operação. Entende-se por escorva o processo de preenchimento total de líquido da tubulação de sucção da bomba, a fim de evitar que a mesma opere vazia ou com ar. No processo de escorva, o ar ou gases contidos na tubulação de sucção são substituídos pelo líquido a ser bombeado. Existem pelo menos quatro formas de realizar o processo de escorva de uma bomba. Pode ser utilizada uma válvula de pé, um tanque de escorva, um ejetor ou uma bomba de vácuo. Estes processos são utilizados quando o reservatório de sucção da bomba se encontra em um nível abaixo da linha de centro da bomba (Mattos e Falco, 1998). De acordo com Macintyre (2010), no início do funcionamento as turbobombas não são capazes de expulsar o ar contido no interior da tubulação de sucção, criando assim vácuo capaz de preencher o impelidor da bomba com o fluido a ser bombeado. Em outras palavras, as bombas não são auto-aspirantes ou auto-escorvantes.

Mattos e Falco (1998) definem um tanque de escorva como um dispositivo para manter a bomba escorvada sem a utilização de uma válvula de pé. O sistema consiste de um tanque, junto a sucção da bomba, que, por diferença de pressão, faz com que o líquido contido no reservatório escoe para o interior do tanque de escorva, mantendo assim a bomba escorvada. Os autores comentam que, para que o sistema tenha desempenho adequado, o tanque de escorva deve ter aproximadamente três vezes o volume da tubulação de sucção da bomba. Cabe salientar que esta relação proposta por Mattos e Falco (1998) carece de estudos mais aprofundados no campo científico, onde seja comprovada a relação proposta. As pesquisas realizadas mostram a utilização deste sistema principalmente na indústria agrária, para transporte de água para campos de irrigação de feijão, cana de açúcar entre outros, porém em áreas industriais, com outros fluidos, não foram encontradas referências.

Bettini (2007) propôs uma equação para validação de um tanque de escorva para bomba centrífuga utilizando a Lei de Boyle (Çengel e Boles, 2013). Esta lei modela com certa precisão o comportamento da maioria dos gases a pressões abaixo da pressão atmosférica.

O sistema físico em estudo está localizado no Polo Petroquímico de Triunfo (RS), na planta de Olefinas 2 da empresa Braskem. Trata-se de um vaso que recebe óleo, oriundo das liberações de diversos equipamentos. Este óleo é armazenado no mencionado tanque e, conforme necessário, é bombeado de volta ao processo por uma bomba centrífuga. Esta bomba localiza-se acima do nível do vaso, caracterizando uma situação de bomba não afogada. Assim, é necessário realizar a escorva da mesma, juntamente com a tubulação de sucção. Previamente a escorva era feita através de uma válvula de pé, localizada no fundo do vaso junto da tubulação de sucção, porém particulados contidos no fluido costumavam trancar a válvula na posição aberta, impossibilitando assim a escorva da bomba, e por consequência, seu correto funcionamento. A disponibilidade deste sistema é de

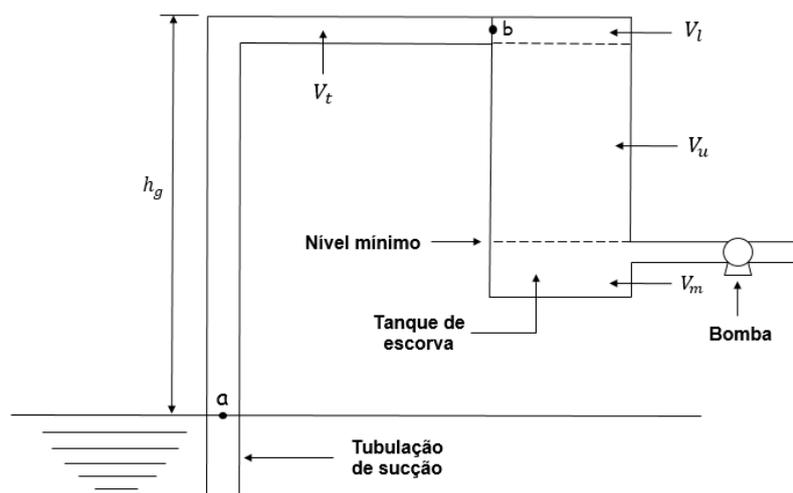
fundamental importância para absorver liberações programadas ou não de equipamentos, como também descargas de válvulas de segurança de processo para ali direcionadas. Portanto, a implantação de um sistema confiável de bombeamento de óleo, foi considerada uma questão crucial para o bom funcionamento do processo e a manutenção da segurança industrial. A implantação de um vaso de escorva surgiu como uma alternativa relativamente simples para a solução da questão de manter a bomba escorvada e, assim, evitar paradas no processo.

O presente trabalho teve por objetivo modelar matematicamente um sistema de escorva, comparar resultados da modelagem com resultados durante a operação real e avaliar a funcionalidade deste tipo de equipamento para a escorva de bombas de óleo em um sistema de segurança de uma indústria petroquímica.

### ***Modelagem Matemática***

A Figura 1 mostra o esquema de um tanque de escorva. Verifica-se que o reservatório a partir do qual o líquido deve ser recalado encontra-se a uma altura inferior à da bomba. O tanque de escorva é localizado junto à bomba, atuando como um reservatório secundário, que tem como finalidade manter a bomba escorvada. Encontrando-se o tanque de escorva inicialmente preenchido de líquido até uma altura  $h_1$  a partir do nível de referência. Ao dar-se a partida na bomba, o líquido é aspirado e seu nível no interior do tanque de escorva cai até a altura  $h_2$ , onde a redução do volume ocupado pelo líquido no tanque causa o aumento do volume do gás presente na tubulação, e conseqüentemente a redução de sua pressão. Esta redução de pressão deve ser no mínimo capaz de recalcar o líquido do reservatório principal, vencendo a altura geométrica e as perdas de carga através da tubulação de recalque. Em um caso em que o rebaixamento no interior do tanque fosse inferior ao nível mínimo, ocorreria cavitação na bomba e falha do sistema. Segundo Bettini (2007), isto ocorreria quando o tanque estivesse subdimensionado para a tubulação de sucção.

Bettini (2007) define no esquema da Figura 1 o volume livre,  $V_l$ , volume superior do tanque de escorva que nunca é ocupado por líquido, volume útil,  $V_u$ , volume que pode ser ocupado por líquido ou por gás quando a bomba é ligada, volume morto,  $V_m$ , o volume abaixo do nível da linha de sucção da bomba, que deve estar sempre preenchido de líquido, e volume da tubulação de recalque,  $V_t$ , o volume da tubulação que inicialmente se encontra preenchido com gás, e, durante a operação da bomba, fica preenchido de líquido.



**Figura 1.** Esquema para modelagem do tanque de escorva.

Fonte: Adaptado de Bettini (2007 p.7).

A Lei de Boyle (Çengel e Boles, 2013) estabelece que, durante um processo isotérmico, um gás perfeito segue a relação

$$P_1 V_1 = P_2 V_2 \quad (1)$$

na qual P e V são a pressão e o volume, nos estados inicial, 1 e final, 2.

A Lei de Boyle pode ser utilizada para calcular a pressão no vaso de escorva, quando o nível de líquido cai a partir de um nível inicial. Considerando-se que no estado inicial o gás ocupa a tubulação e o volume livre, tem-se

$$V_1 = V_t + V_l \quad (2)$$

No estado final, ou seja, durante a operação, o líquido passa a ocupar o volume da tubulação, e o nível de líquido no tanque cai, sendo então o volume útil ocupado por gás. Assim, o volume final de gás é:

$$V_2 = V_u + V_l \quad (3)$$

Assim, pela Lei de Boyle pode-se considerar que:

$$P_1 (V_t + V_l) = P_2 (V_u + V_l) \quad (4)$$

A pressão inicial  $P_1$  é igual à pressão atmosférica local, e chama-se  $h_0$  a altura manométrica inicial,

$$h_0 = \frac{P_1}{\gamma} \quad (5)$$

onde  $\gamma$  é o peso específico do líquido. Aplicando-se a Equação de Energia Mecânica (Moran et al., 2005) entre os pontos a e b na Figura 1, pode-se deduzir uma expressão para o valor máximo da

pressão  $P_2$  e, conseqüentemente, para o mínimo volume útil do tanque de escorva. A Equação da Energia Mecânica entre os pontos a e b na Figura 1 é dada por:

$$\frac{P_a}{\gamma} - h_l = \frac{P_b}{\gamma} - h_g \quad (6)$$

onde  $P_a$  é a pressão atmosférica em a, ou seja, igual a  $P_1$ ,  $h_l$  é a perda de carga na tubulação de recalque (perdas normais e localizadas) e  $h_g$  é a altura geométrica vertical com respeito ao nível de referência. A pressão em b,  $P_b$ , é a pressão  $P_2$  que deve ser atingida durante o funcionamento do sistema. Chamando  $h_s$  a altura de sucção, dada por:

$$h_s = h_g + h_l \quad (7)$$

tem-se,

$$\frac{P_2}{\gamma} = h_0 - h_s \quad (8)$$

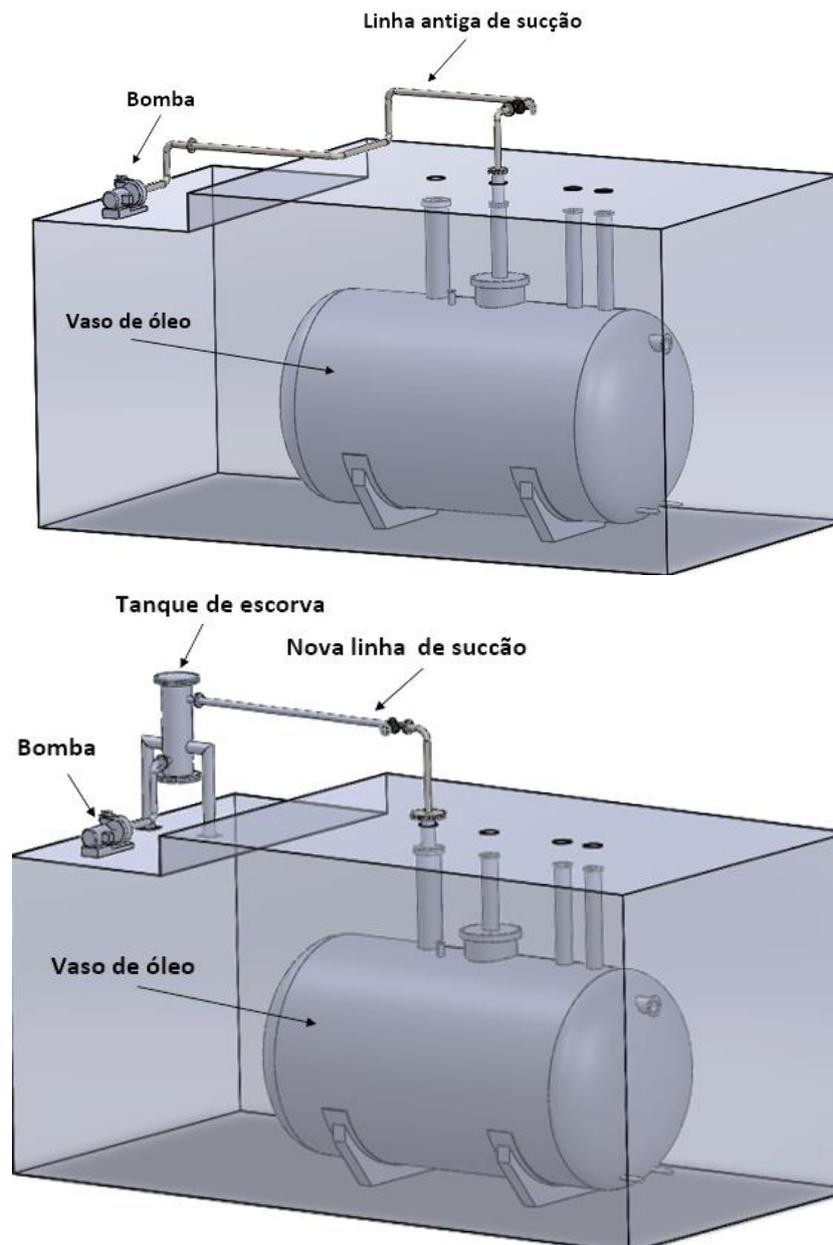
e pode-se combinar a Equação 8 com a Equação 4, obtendo-se

$$\frac{(V_u + V_l)}{(V_t + V_l)} = \frac{h_0}{h_0 - h_s} \quad (9)$$

A Equação 9, portanto, representa a modelagem matemática do tanque de escorva e serve para determinar o volume útil mínimo de acordo com as perdas de carga de uma tubulação de recalque específica.

### **Modelo Físico**

A Figura 2 mostra o tanque principal com seu modo de funcionamento antigo, utilizando a válvula de pé (Figura 2-a), e o modo de funcionamento proposto, utilizando o tanque de escorva (Figura 2-b).



**Figura 2.** Modelo físico: (a) Com válvula de pé e (b) Com tanque de escorva.

O tanque principal, que contém o óleo a ser sucionado pela bomba, tem um volume aproximado de 35 m<sup>3</sup>. A temperatura no interior do tanque é de 120 °C, podendo atingir 160 °C. A elevação de temperatura se dá pela utilização de vapores aquecidos, oriundos do sistema de utilidades da planta, na liberação dos equipamentos. O tanque opera a pressão ambiente.

A massa específica do óleo no interior do vaso é de 900 kg/m<sup>3</sup>, porém a viscosidade pode variar de 0,0069 N.s/m<sup>2</sup> a 0,0971 N.s/m<sup>2</sup>. A variação da viscosidade se dá em função do tipo de matéria prima que está sendo utilizada no processo.

A temperatura do óleo é de 120°C na condição de operação normal, e a pressão de vapor do óleo para esta temperatura é de 21,6 kPa.

A bomba utilizada neste sistema é o modelo JC10, fabricante Beto Bomba, com altura manométrica total de 5,61 kgf/cm<sup>2</sup> (550,15 kPa). A pressão máxima da bomba é de 5,2 kgf/cm<sup>2</sup> (510 kPa) e potência de 10 cv (7,36 kW).

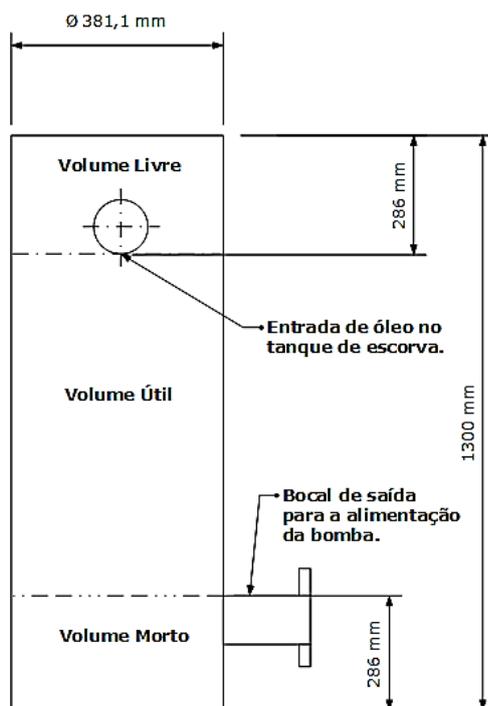
A vazão de operação ideal do sistema é de 3 m<sup>3</sup>/h. Busca-se respeitar esta faixa de vazão para que o volume de óleo contido no vaso não interfira nas condições operacionais da torre de óleo, para o qual o óleo é bombeado. Uma vazão acima desta tiraria a torre de óleo da sua faixa ideal de operação. Para evitar que ocorra o envio de vazões acima de 3 m<sup>3</sup>/h, devido à variação da viscosidade do produto bombeado, foi considerado como condição normal o envio de óleo com a menor viscosidade (0,0069 N.s/m<sup>2</sup>), ou seja, a vazão bombeada será inferior a 3 m<sup>3</sup>/h para viscosidades superiores.

O modelo físico foi construído de modo a seguir a sugestão da literatura de que o volume do tanque de escorva tenha aproximadamente três vezes o volume da tubulação de sucção do tanque principal (Mattos e Falco, 1998). Assim, os volumes totais da linha de sucção e do tanque de escorva são apresentados na Tabela 1.

**Tabela 1.** Volumes do tanque de escorva e da linha de sucção.

Componente	Volume (m <sup>3</sup> )
Tubulação de sucção	0,044
Tubulação de escorva	0,15

As dimensões detalhadas do tanque de escorva são dadas pela Figura 3.



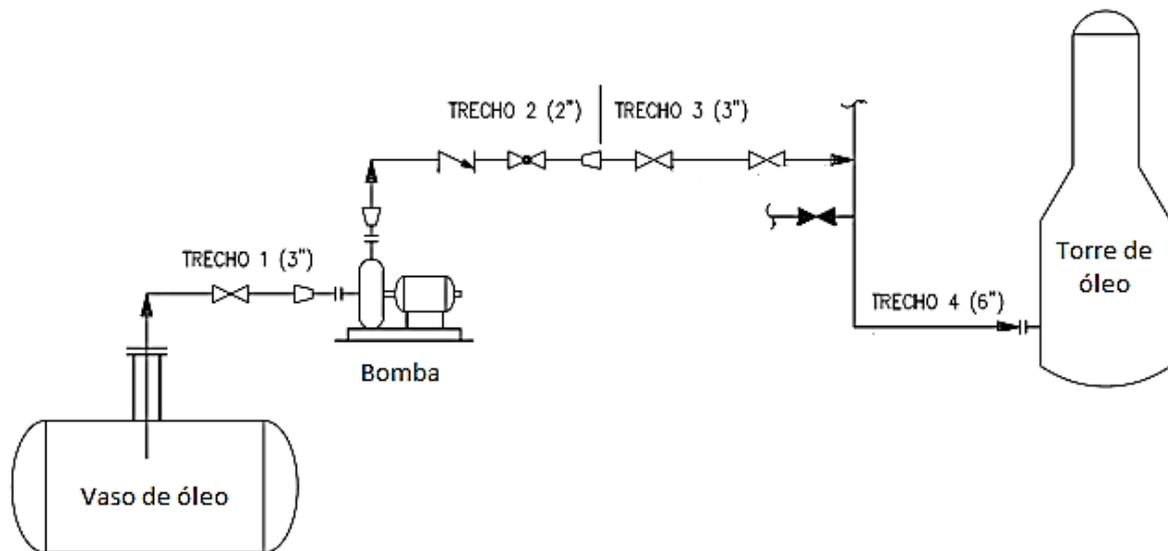
**Figura 3.** Dimensões do tanque de escorva.

Utilizando estas dimensões pode-se calcular os volumes útil,  $V_u$ , livre,  $V_l$ , e morto,  $V_m$ , conforme definido na seção anterior e Figura 1. Os mesmos são resumidos na Tabela 2. A Tabela 2 também apresenta o volume da tubulação da linha de sucção,  $V_t$ .

**Tabela 2.** Relações de volumes do tanque de escorva.

Dimensão	Diâmetro (m)	Altura (m)	Volume (m <sup>3</sup> )
$V_u$	0,381	0,728	0,083
$V_l$	0,381	0,286	0,0326
$V_m$	0,381	0,286	0,0326
$V_t$	0,381	9,367	0,044

Na Figura 4 apresenta-se o esquema de bombeamento do sistema sem tanque de escorva, ou seja, o sistema antigo, utilizando a válvula de pé. Na Tabela 3 são apresentados os dados relevantes para o cálculo da curva do sistema.

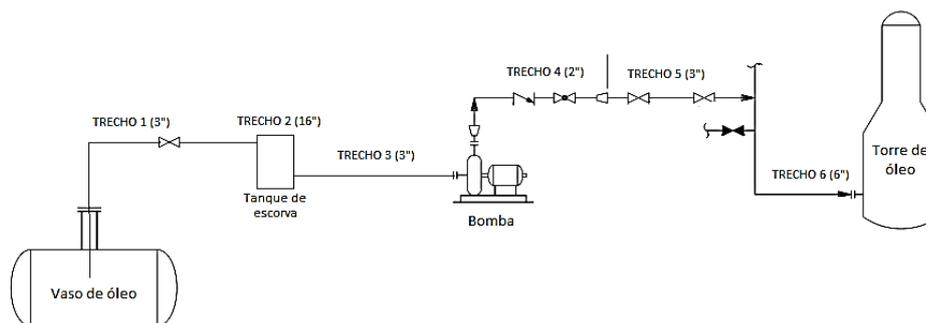


**Figura 4.** Trechos de tubulação do sistema sem tanque de escorva.

**Tabela 3.** Dados referentes ao sistema sem tanque de escorva.

Trecho	1	2	3	4
Diâmetro nominal (polegadas)	3	2	3	6
Diâmetro interno (m)	0,0779	0,0525	0,0779	0,154
Comprimento (m)	14,230	8,680	18,5	21
Variação de altura (m)	3,817	-0,01	4,1	14,4
<b>Acessórios</b>	<b>Quantidade</b>			
Joelho 90°	7	6	5	6
Tê divisão de fluxo	0	1	1	0
Válvula gaveta	1	1	2	0
Válvula de Retenção	1	1	0	0
Entrada de equipamento	1	0	0	1

Na Figura 5 e Tabela 4 são apresentados o esquema do sistema com tanque de escorva e os dados para cálculo da curva do sistema.



**Figura 5.** Trechos de tubulação do sistema com tanque de escorva.

**Tabela 4.** Dados referentes ao sistema com tanque de escorva.

Trecho	1	2	3
Diâmetro nominal (polegadas)	3	16	3
Diâmetro interno (m)	0,0779	0,381	0,0779
Comprimento (m)	9,367	1,3	1,928
Variação de altura (m)	5,369	-0,80	-0,746
Acessórios	Quantidade		
Joelho 90°	1	0	2
Tê divisão de fluxo	0	0	0
Válvula gaveta	1	0	0
Válvula de Retenção	0	0	0
Redução	0	1	0
Expansão	0	1	0
Entrada de equipamento	1	0	0

Os trechos de tubulação mostrados na Tabela 4 referem-se à linha de sucção da bomba. Os trechos de descarga, representados na Figura 5 pelos trechos 4, 5 e 6, são os idênticos aos trechos 2, 3 e 4 da Tabela 3.

Para o cálculo das curvas de carga em função da vazão, para os sistemas com e sem tanque de escorva, foram utilizados os valores dos sistemas reais, os quais são resumidos nas Tabelas 5 e 6, respectivamente.

**Tabela 5.** Dados para cálculo da curva do sistema sem tanque de escorva.

Trecho	1	2	3	4
Massa específica (kg/m <sup>3</sup> )	900	900	900	900
Viscosidade (kg.m/s)	0,0069	0,0069	0,0069	0,0069
Rugosidade	----	0,000046	----	----
Diâmetro interno (m)	0,0779	0,0525	0,0779	0,154
Variação de altura (m)	3,817	-0,01	4,1	14,4

**Tabela 6.** Dados para cálculo da curva do sistema com tanque de escorva.

Trecho	1	2	3
Massa específica (kg/m <sup>3</sup> )	900	900	900
Viscosidade (kg.m/s)	0,0069	0,0069	0,0069
Rugosidade	----	----	----
Diâmetro interno (m)	0,0779	0,381	0,0779
Variação de altura (m)	5,369	-0,806	-0,746

## Resultados e Discussão

As Tabelas 7 e 8 informam os valores de números de Reynolds, fator de atrito, perda de carga total, quedas de pressão, NPSH disponível e potência cedida pela bomba para a vazão nominal de 3 m<sup>3</sup>/h.

**Tabela 7.** Resultados calculados a partir da Tabela 5 para o sistema sem tanque de escorva.

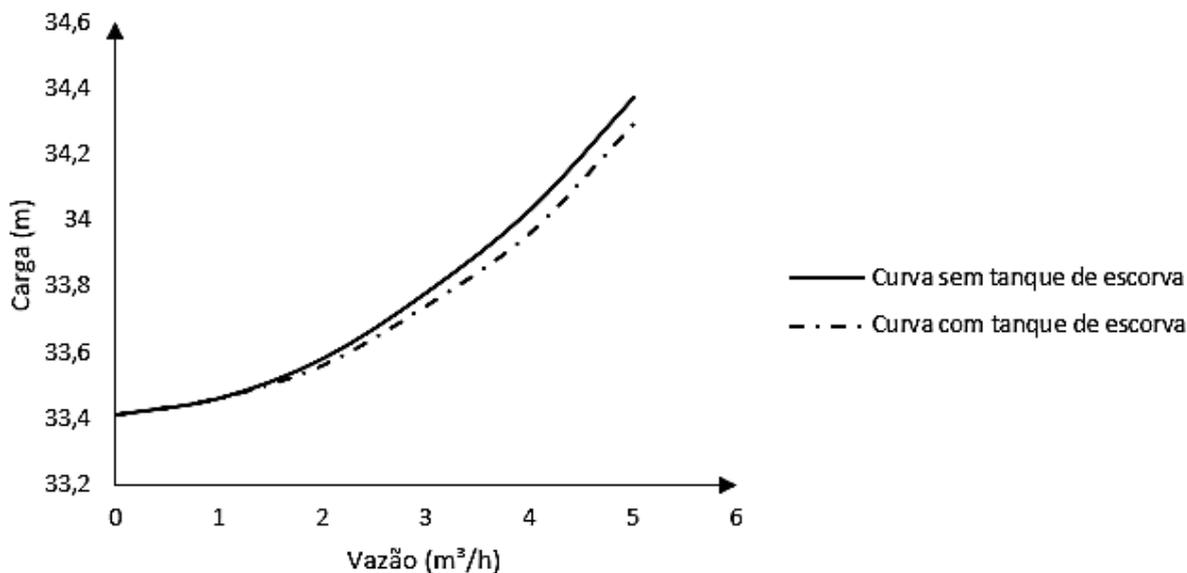
Trecho	1	2	3	4
Número de Reynolds	1776	2635	1776	898,3
Fator de atrito	0,03604	0,04686	0,0360	0,0712
Perda de carga total $h_z$ (m)	0,0577	0,2773	0,0270	0,0020
$\Delta P$ (Pa)	- 33,652	98,281	134,29	225,17
$\Delta P$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	- 0,3432	1	1,369	2,296
$\Delta P$ da bomba (kgf/cm <sup>2</sup> )	4,66			
H estático do sistema (m)	33,41			
Altura manométrica total (m)	37,3			
NPSH disponível (m)	5,15			
Potência cedida (cv)	3,65			

**Tabela 8.** Resultados calculados a partir da Tabela 7 para o sistema com tanque de escorva.

Trecho	1	2	3
Número de Reynolds	1776	363,1	1776
Fator de atrito	0,03604	0,1763	0,03604
Perda de carga total $h_z$ (m)	0,01087	0,00004	0,00606
$\Delta P$ (Pa)	- 36,677	- 7,114	- 6,653
$\Delta P$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	- 0,3434	- 0,0072	- 0,0678
$\Delta P$ da bomba (kgf/cm <sup>2</sup> )	4,66		
H estático do sistema (m)	33,41		
Altura manométrica total (m)	37,3		
NPSH disponível (m)	5,2		
Potência cedida (cv)	3,65		

### Curvas de carga em função da vazão

Variando a vazão do sistema em torno de uma vazão nominal igual e 3 m<sup>3</sup>/h, foram determinadas as curvas de carga em função da vazão para os sistemas sem e com tanque de escorva. As mesmas são mostradas de forma comparativa na Figura 6.



**Figura 6.** Curva comparativa entre os sistemas sem e com vaso de escorva.

Percebe-se que a instalação do tanque de escorva mantém praticamente inalterada a carga do sistema. O trecho de descarga do sistema não sofreu alterações entre um e outro projeto, portanto a pequena diferença apresentada representa as alterações no alinhamento de sucção. Para as vazões consideradas, a introdução do tanque de escorva e a alteração do alinhamento de sucção diminuíram a perda de carga total do sistema.

### Validação da modelagem do tanque de escorva

Através da Equação 9 e dos dados da Tabela 2, pode-se determinar qual será o a máxima carga de sucção do tanque de escorva, de acordo com sua geometria, detalhada na Figura 3 e na Tabela 2. Em outras palavras, pode-se determinar qual é a altura geométrica,  $h_g$ , máxima de sucção do sistema, considerando as perdas de carga calculadas anteriormente. Para as relações de volume do modelo físico, obteve-se uma altura geométrica de sucção máxima de - 3,861 m. Assim, para este modelo, a bomba nunca perderá escorva, pois o nível mínimo de óleo do vaso possui altura geométrica igual a - 3,817 m abaixo da bomba.

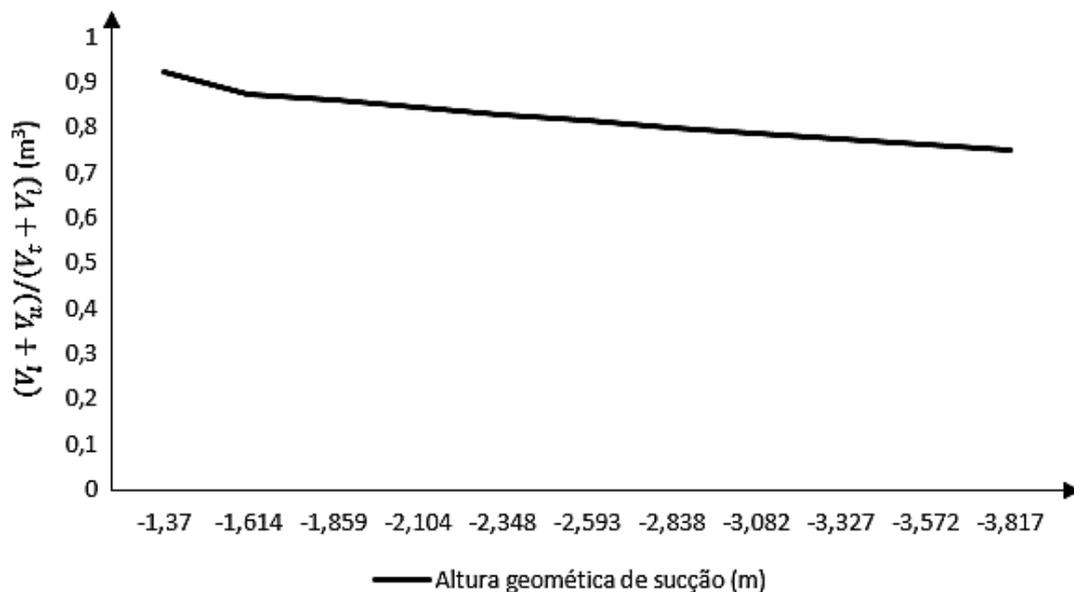
A relação entre volumes também pode ser expressa em termos da relação  $(V_l+V_u)/(V_t+V_l)$ , onde, conforme o nível de líquido no interior do tanque diminui, esta relação diminui e fornece maiores

cargas de sucção. A Tabela 9 mostra a altura geométrica máxima de sucção de acordo com a relação citada.

**Tabela 9.** Altura geométrica de sucção em função da fração de volumes  $(V_l+V_u)/(V_t+V_l)$ .

Altura geométrica de sucção, hg (m)	$(V_l+V_u)/(V_t+V_l)$
- 1,370	0,9222
- 1,614	0,8755
- 1,859	0,8595
- 2,104	0,844
- 2,348	0,8291
- 2,593	0,8147
- 2,838	0,8000
- 3,082	0,7873
- 3,327	0,7743
- 3,572	0,7618
- 3,817	0,7496

A Figura 7 mostra, de forma mais clara, a diminuição do volume útil no interior do tanque de escorva necessária para o aumento da altura de sucção hg. Pode-se concluir que, conforme diminua o nível de líquido no tanque principal, o volume útil no tanque de escorva deve diminuir.



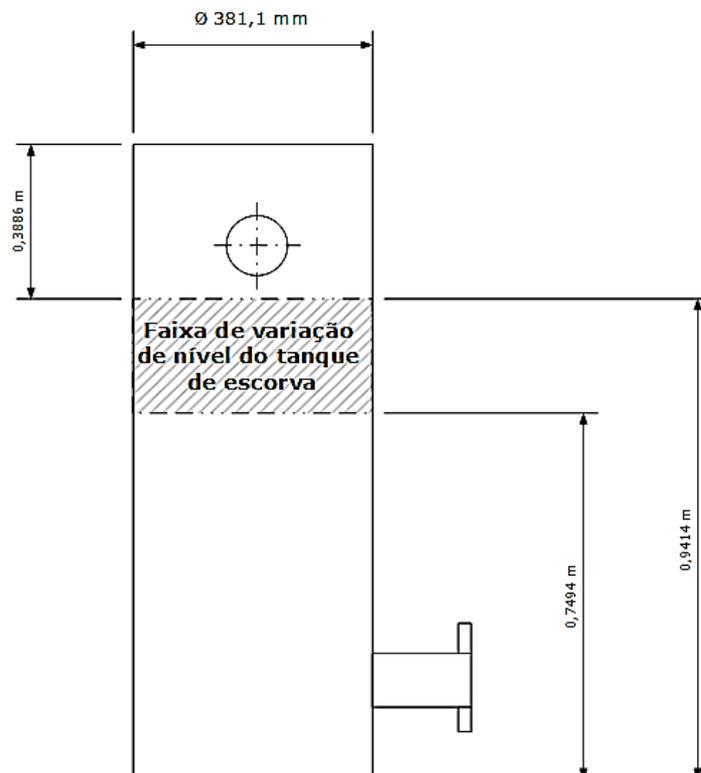
**Figura 7.** Em função da altura geométrica de sucção.

Utilizando novamente a Equação 9, pode-se determinar qual é nível de trabalho do tanque de escorva. Para isso, foi realizada a variação dos volumes úteis e livres do tanque. Quando maior o volume livre e menor o volume útil do tanque, menor é a altura geométrica de sucção possível. A Tabela 10 apresenta estas variações, complementando-as com o valor do nível de óleo no tanque de escorva para cada relação entre volume útil e volume livre.

**Tabela 10.** Variação entre volumes do tanque de escorva.

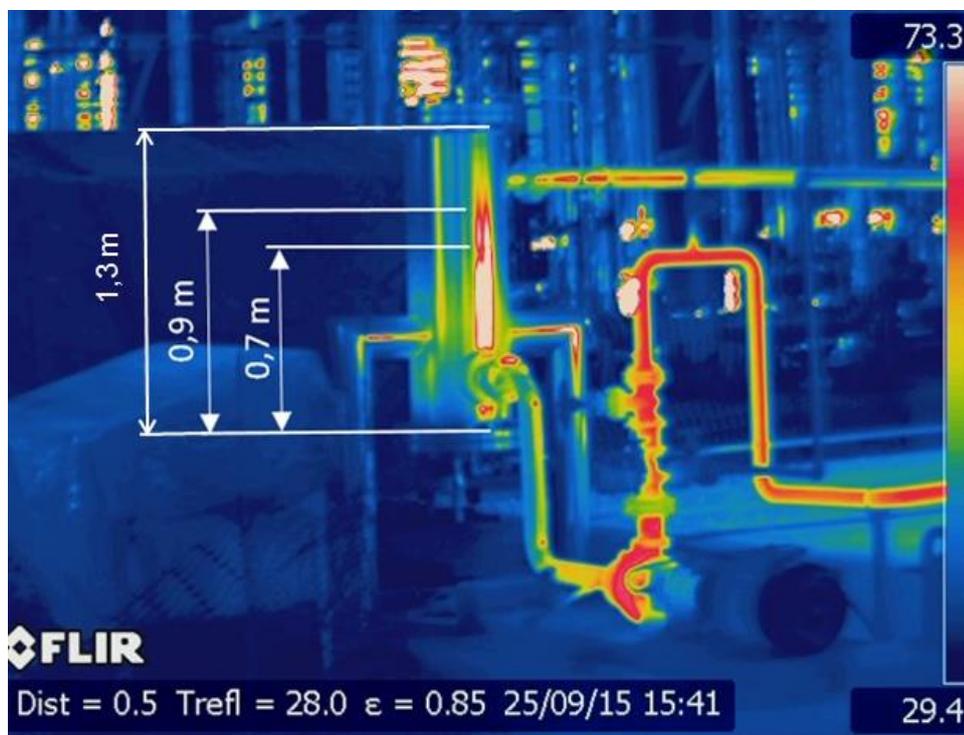
Altura geométrica de sucção, hg (m)	Volume útil (m <sup>3</sup> )	Volume livre(m <sup>3</sup> )	Nível no tanque de escorva (m)
- 0,528 m	0,083	0,0326	1,014
- 1,407 m	0,0747	0,0409	0,9414
- 2,224 m	0,0664	0,0492	0,8686
- 3,065 m	0,0581	0,0575	0,7958
- 3,889 m	0,0489	0,0628	0,7494

A variação do volume útil, conforme a Tabela 10, para valores superiores a 0,0747 m<sup>3</sup>, interfere na altura geométrica de sucção impossibilitando o correto funcionamento do sistema. É importante ressaltar que para as relações de volumes descritas acima obteve-se uma altura de sucção máxima de - 3.889 m. Logo, a bomba não perderá escorva, pois, o nível mínimo de óleo no vaso possui altura geométrica de sucção igual a -3.817 m. Diante disso, espera-se o que o sistema opere entre os volumes úteis de 0,0747 m<sup>3</sup> e 0,0489 m<sup>3</sup>. Convertendo os valores de volume em termos de altura de nível de líquido, a faixa de variação de nível do tanque de óleo é de 0,7494 m a 0,9414 m. Na Figura 8, pode-se observar a variação de volume conforme calculado.



**Figura 8.** Variação do nível do tanque de escorva, conforme calculado.

A comprovação da variação calculada para o nível de óleo no tanque de escorva foi realizada com o auxílio de imagens termográficas. Com o sistema operando, e o vaso de óleo com 40% de nível obteve-se a imagem mostrada na Figura 9.



**Figura 9.** Termografia do tanque de escorva durante operação.

A presença de óleo no interior do tanque de escorva pode ser detectada pelo aparecimento de uma região de mais alta temperatura. Pode-se observar que o nível de óleo, neste caso, encontra-se aproximadamente na altura de 0,9 m, o que corrobora a previsão na Tabela 10.

Diante disso, assume-se que a modelagem proposta apresenta bons resultados para a validação do sistema, para as condições de operação testadas.

O sistema com tanque de escorva já vem operando há vários meses sem nenhuma intervenção de manutenção. No sistema com válvula de pé, eram necessárias liberações periódicas da linha de sucção e do vaso de óleo para limpeza, pois a válvula de pé sofria frequentes obstruções.

A fim de se evitar o problema da necessidade de escorva de bombas, existem tecnologias como as bombas a vácuo ou autoescorvantes. No entanto, em função do alto custo destes equipamentos, um sistema de tanque de escorva seria a alternativa mais viável economicamente para o caso em estudo. Todo alinhamento modificado foi realizado utilizando linhas disponíveis no almoxarifado da empresa, reduzindo, assim, consideravelmente os custos de projeto.

## Conclusão

O presente trabalho apresentou uma proposta de modelagem matemática para um tanque de escorva baseado na Lei de Boyle para gases ideais. Pode-se concluir que a substituição da válvula de pé pelo sistema com tanque de escorva diminui a perda de carga total do sistema, devido aos comprimentos equivalentes da tubulação serem menores, e ao fato da válvula de pé inserir alta perda de carga ao sistema.

A modelagem matemática proposta apresentou uma excelente aproximação dos resultados reais obtidos no processo. As deduções e relações de volumes do tanque, de acordo com as equações utilizadas, se mostram próximas às medições durante o processo de operação real. Diante deste fator os autores acreditam que as relações aqui propostas podem ser utilizadas para o dimensionamento de outros sistemas, trazendo uma contribuição importante para o desenvolvimento de tanques de escorva para bombas centrífugas que trabalham nas condições aqui propostas.

É importante salientar também a dificuldade de encontrar trabalhos que referenciem as teorias aqui desenvolvidas. Durante as pesquisas foram encontradas alguma referência na indústria agrária, para irrigação de feijão e cana de açúcar, porém esta área parece carecer de estudos mais aprofundados relacionadas ao tema. O trabalho aqui proposto parece ser pioneiro na indústria petroquímica, desenvolvendo uma solução relativamente simples para um sistema importante para operação do setor petroquímico.

Na sua totalidade, o projeto desenvolvido atingiu os objetivos, e vem apresentando excelentes resultados. A eficiência do sistema ao longo do tempo também obteve um ótimo resultado, pois considerando 1 ano após a modificação não foram necessárias intervenções de manutenção no sistema versus as 5 manutenções necessárias ao ano anterior a modificação.

## Referências

BETTINI, M. O. 2007. *Modelagem para dimensionamento de tanque de escorva para instalações de bombeamento utilizando a lei de Boyle*. Jaboticabal, SP. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, 50 p.

BOMBAS BETO. Catálogo Motobomba Centrífuga. Disponível em:  
<http://www.bombasbeto.com.br/uploads/pdf/270714170745-BOMBA%20JC.pdf>. Acesso em:  
11/09/2015

ÇENGEL, Y. A., BOLES, M. A. 2013. *Termodinâmica*. 7. ed., New York, NY, Mc Graw Hill, 1048 p.

MORAN, M.J., SHAPIRO, H.N., MUNSON, B.R.; DEWITT, D. P. 2005. *Introdução à Engenharia de Sistemas Térmicos*. Rio de Janeiro, RJ, LTC, 620 p.

MACINTYRE, A. J. 2010. *Bombas e instalações de bombeamento*. 2. ed., Rio de Janeiro, RJ, LTC.  
MATTOS, E. E.; FALCO, R. 1998. *Bombas industriais*. 2. ed., Rio de Janeiro, RJ, Interciência.

*Submetido: 03/05/2017*

*Aceito: 29/11/2017*