



**II CONEPETRO**

II CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA DE  
PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS  
IV WORKSHOP DE ENGENHARIA DE PETRÓLEO

## ANÁLISE GEOMÉTRICA DE EJETORES PARA DESCOMPRESSÃO DO REVESTIMENTO EM POÇOS MADUROS

Kael Weingartner Chagas<sup>1</sup>; Kaio César Medeiros Álvares<sup>2</sup>; Leonardo Asfora de Oliveira<sup>3</sup>;  
Lindemberg de Jesus Nogueira Duarte<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Graduando em Engenheiro de Petróleo – [kaelchagas@msn.com](mailto:kaelchagas@msn.com)

<sup>2</sup> Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Engenheiro de Petróleo – [kakaio12@hotmail.com](mailto:kakaio12@hotmail.com)

<sup>3</sup> Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Mestrando em Engenharia de Petróleo – [leoasfora@hotmail.com](mailto:leoasfora@hotmail.com)

<sup>4</sup> Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Professor em Engenharia de Petróleo – [ljnduarte@hotmail.com](mailto:ljnduarte@hotmail.com)

### RESUMO

Durante a vida produtiva de um poço, é comum a utilização de métodos de elevação artificial para aumentar a produção de poços. Dentre os mais utilizados, estão o Bombeio Centrífugo Submerso (BCS), Bombeio por Cavidades Progressivas (BCP) e Bombeio Mecânico (BM). Especialmente nestes métodos, a presença de gás no processo acarreta uma redução na eficiência de produção, tornando-se necessária a instalação de equipamentos que evitem a entrada do gás na sucção da bomba. Com isso, ao utilizar tais métodos, torna-se comum o acúmulo de gás no anular entre a coluna de produção e o revestimento do poço. Com o passar do tempo, devido à impossibilidade de liberar diretamente o gás para a atmosfera, o mesmo gera uma crescente contrapressão no fundo do poço, diminuindo assim o seu potencial de produção. Uma possibilidade utilizada para diminuir essa pressão seria a conexão entre o revestimento e a linha de produção do poço, porém, o fluxo de gás só ocorre quando a pressão de revestimento é maior do que a pressão na linha, sendo a última limitante da pressão de revestimento. Visando contornar este problema, foi estudado a utilização de um ejetor acoplado à cabeça do poço, permitindo que o fluxo de fluido produzido seja utilizado para aspirar o gás acumulado. Através da utilização de uma ferramenta computacional para dimensionamento de ejetores gás-líquido, buscou-se a validação do funcionamento e avaliação da geometria ótima do equipamento utilizando o simulador ANSYS CFX. Os resultados preliminares confirmaram a viabilidade de ejetores para tais fins, e forneceram vertentes importantes relativas ao dimensionamento do equipamento.

**Palavras-chave:** Ejetor, CFX, Elevação artificial.

### 1. INTRODUÇÃO

Segundo Brown [1982], a elevação artificial se utiliza de técnicas e ferramentas para viabilizar a produção de poços não surgentes, assim como aumentar a produção de poços que produzem por elevação natural. Dentre os métodos existentes, estão incluídos

os que se utilizam de sistemas de bombeio, como por exemplo: bombeio mecânico por hastes, bombeio centrífugo submerso e bombeio por cavidades progressivas. Nesses três métodos, a presença de gás na sucção da bomba faz com que haja uma redução na eficiência da mesma, tornando-se necessário a utilização de equipamentos que impeçam a entrada do gás na sucção da bomba. Tais

[www.conepetro.com.br](http://www.conepetro.com.br)

br

(83) 3322.3222

[contato@conepetro.com.br](mailto:contato@conepetro.com.br)

equipamentos fazem com que o gás seja separado para o espaço anular do poço. Devido à impossibilidade de liberar diretamente o gás para a atmosfera por questões ambientais e de segurança, o gás vai se acumulando no anular. Essa compressão faz com que a pressão de fluxo de fundo aumente, acarretando a diminuição da produção. Uma solução plausível seria realizar uma conexão entre o revestimento e a linha de produção do poço, porém em algumas situações a pressão na linha é igual ou superior à do revestimento, o que impossibilitaria o fluxo de gás. Diante deste problema, o ejetor surge como uma solução de baixo custo e capaz de reduzir a pressão de revestimento através da sucção do gás do anular utilizando a energia cinética da própria produção do poço. Os trabalhos de Cunningham [1974 a, b] mostraram que o funcionamento de um ejetor começa a partir do momento em que o fluido primário entra no equipamento com uma pressão inicial,  $P_i$ . Em seguida, devido a redução de área imposta pelo bocal, o fluido primário sofre um aumento de velocidade, deixando o bocal com uma pressão  $P_o$ , onde  $P_i > P_o$ . Esse aumento da velocidade acarreta uma queda de pressão, fazendo com que o fluido secundário, que se encontra em uma condição de estagnação, possa ser succionado a uma pressão de sucção  $P_s$ . Esse diferencial de pressão entre a sucção

e a saída do bocal é o responsável pela aspiração do fluido secundário para o interior do ejetor. Após entrar na câmara de sucção, o fluido secundário entra em contato com o fluido motriz, que o arrasta para o interior da garganta, onde passam a se misturar através de um processo que envolve a transferência da quantidade de movimento, saindo da garganta a uma pressão  $P_t$ . Por último, a mistura passa pelo difusor. Ele é o responsável pelo aumento da área de fluxo, fazendo com que ocorra uma redução da velocidade da mistura, sendo possível converter a energia cinética em energia de pressão, pressão essa chamada de pressão de descarga  $P_d$ , como observado na Figura 1.

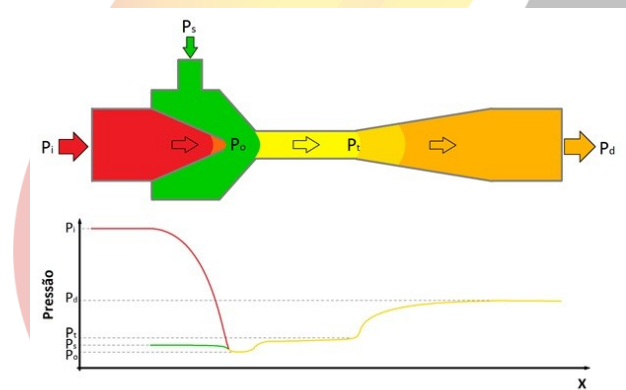


Figura 1: Comportamento esperado da pressão ao longo do ejetor.

Para avaliação de futura aplicabilidade prática, utilizou-se o simulador de dinâmica de fluidos computacional ANSYS CFX. Para um melhor entendimento das principais variáveis que interferem na eficiência do ejetor, algumas de suas dimensões e condições operacionais serão avaliadas.

## 2. METODOLOGIA

### 2.1. Geometria do ejetor

Inicialmente, utilizou-se uma ferramenta computacional, desenvolvida por nosso grupo de pesquisa, que será chamada genericamente de *WHE* para determinar as áreas e comprimentos das suas principais seções. A ferramenta faz uso de equações para cada seção do ejetor, que recebem como entradas variáveis que representam condições as quais o ejetor será submetido, e a partir de processos iterativos, retorna as dimensões do ejetor e sua eficiência como resultados finais.

A ferramenta computacional *WHE* disponibiliza apenas as medidas geométricas recomendadas para os diâmetros e comprimentos do bocal, garganta e difusor do ejetor. Sendo assim, ainda ficam em aberto a análise de diversas outras dimensões que

podem afetar a performance do ejetor. No presente estudo, foram analisados a câmara de sucção, a distância entre o bocal e a garganta, o formato da saída do bocal e a convergência da câmara de sucção. Essas medidas são de extrema importância para se alcançar a melhor eficiência de funcionamento.

### 2.2. Simulação numérica (Simulador CFX)

O *CFX* é um programa de simulação para engenharia pertencente à ANSYS, Inc. Os simuladores disponíveis são capazes de modelar as mais diversas situações possíveis, exemplo: vibrações, análise térmica, análise elétrica, escoamento de fluidos, análises permanente e transiente, dentre outros. [ANSYS 2009].

De posse de informações operacionais genéricas e da geometria do ejetor, utilizou-se o *CFX* para modelar o escoamento de fluidos (petróleo, gás e água) através do ejetor. Nessa modelagem, foram realizadas diversas modificações, tanto na geometria quanto nas condições operacionais, com o intuito de se verificar a sensibilidade do ejetor.

Os dados dos fluidos e condições de contorno de operação do ejetor foram baseados em dados de poços de campos

maduros do Rio Grande do Norte. O Engineering Data Book [GAS PROCESSOR SUPPLIERS ASSOCIATION, 2004] foi utilizado para retirar alguns dados e correlações necessários para o estudo.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

#### 3.1. Validação teórica

Inicialmente, a fim de se testar a validade dos dados obtidos na simulação numérica, plotou-se o gráfico da evolução da pressão ao longo do ejetor, como observado na Figura 2.

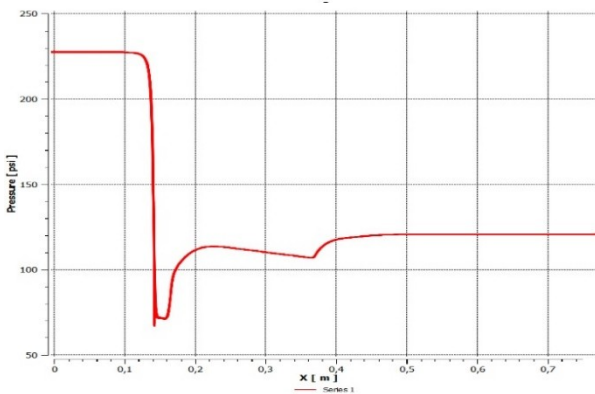
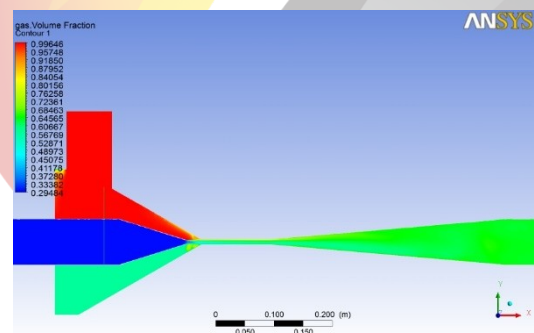


Figura 2: Evolução da pressão ao longo do ejetor.

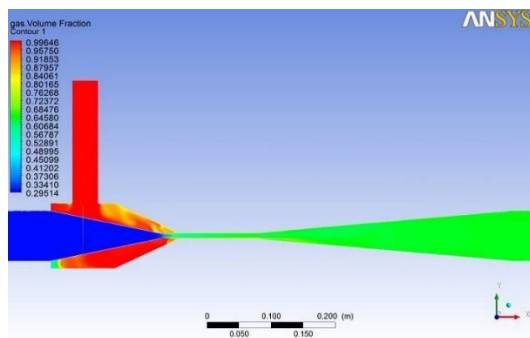
Pode-se observar na Figura 2 que o comportamento da pressão obtido na simulação está de acordo com o esperado para o ejetor. Percebe-se que na câmara de sucção ocorre uma queda brusca de pressão, permitindo que o gás seja aspirado e depois misturado com o fluido motriz na garganta.

#### 3.2. Tamanho da câmara de sucção

Após a obtenção dos resultados, observou-se que o tamanho da câmara de sucção influencia de forma significativa na eficiência do ejetor. A Figura 3 mostra a comparação de dois ejetores com câmaras de tamanhos distintos, onde a variável analisada é a fração volumétrica de gás. As regiões em vermelho representam um valor de 100% de gás, e as regiões em azul representam um valor de 30% de gás.



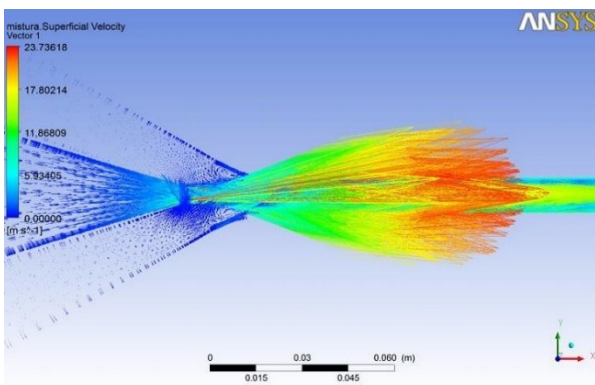
(a) Câmara maior



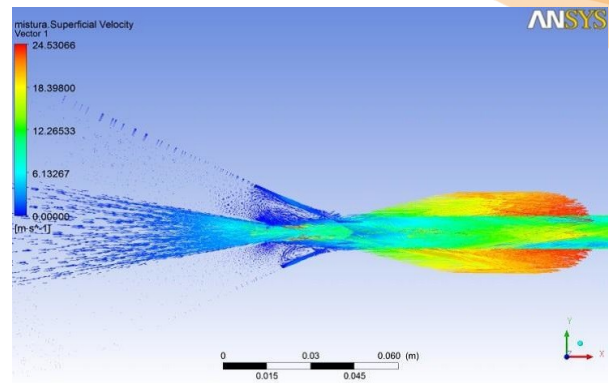
(b) Câmara menor

Figura 3: Comparação da fração volumétrica de gás no ejetor

Observa-se na Figura 3 que há uma grande diferença entre as duas imagens: na figura 3a (cujo tamanho da câmara de sucção é maior) ocorre um acúmulo de líquido na região inferior da câmara, comprometendo a eficiência do ejetor, enquanto na figura 3b o acúmulo é bem menor. Para um melhor entendimento da ocorrência do acúmulo criou-se a Figura 4, mostrando a distribuição dos vetores velocidade do fluido produzido (primário).



(a) Câmara maior



(b) Câmara menor

Figura 4: Vetores velocidade do fluido primário

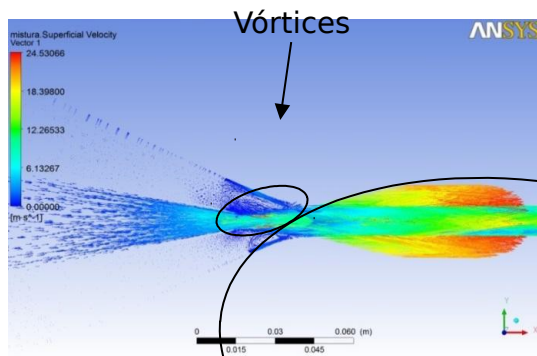
Conforme se pode observar na Figura 4, os vetores da figura 4a (cujo tamanho da câmara de sucção é maior) estão bem mais espalhados que os da figura 4b (câmara de sucção menor). Esse fato explica a ocorrência do acúmulo de líquido (inundação) no caso em que a câmara possui um tamanho maior, pois um maior espalhamento do fluido primário após a saída do bocal faz com que o mesmo colida com as paredes da câmara de sucção e acumule-se na região inferior.

Outro fator causado pela redução do tamanho da câmara é o aumento da velocidade do gás aspirado. Com a redução do tamanho da câmara, reduz-se também o espaço aberto ao fluxo do gás aspirado, ocasionando assim um incremento de velocidade no mesmo e, conseqüentemente, proporcionando maior força ao gás para entrar

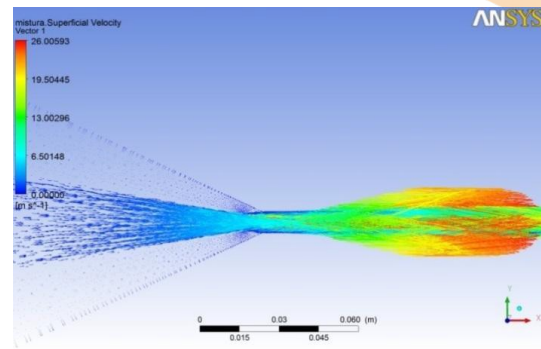
na garganta do ejetor, melhorando a eficiência como um todo.

### 3.3. Distância entre o bocal e a garganta

A outra seção que a ferramenta WHE não dimensiona é a melhor distância entre o bocal e a garganta. Observou-se que tal configuração influencia de forma significativa na eficiência do ejetor. A Figura 5 mostra a comparação de dois ejetores com câmaras de sucção de tamanhos iguais, porém com bocais posicionados de formas diferentes (um está mais afastado da garganta do que o outro). As variáveis analisadas são os vetores velocidade do fluido produzido pelo poço.



(a) Maior distância entre bocal e garganta



(b) Menor distância entre bocal e garganta

Figura 5: Comparação dos bocais através dos vetores velocidade

Através da Figura 5, é possível observar as diferenças entre os dois casos: a Figura 5a retrata o caso em que o bocal está mais distante da garganta, e na Figura 5b o bocal está mais próximo da garganta. A Figura 5a mostra a presença de vórtices na região da entrada da garganta, onde, tal fato ocorre devido a colisão do fluido primário com as paredes da câmara, ocasionando o acúmulo do mesmo. Já na Figura 5b observa-se que a presença de vórtices na entrada da garganta é muito menor, ou seja, a aproximação do bocal na garganta reduziu drasticamente a ocorrência do acúmulo de líquido.

### 3.4. Formato da saída do bocal

O formato da saída do bocal deve minimizar a perda de carga localizada e

proporcionar o direcionamento do jato para a garganta. Três casos foram testados, com saídas do bocal nos formatos convergente, reto e divergente. O direcionamento do jato pode ser analisado na Figura 6.

Pode-se notar que há um melhor direcionamento do jato no bocal reto. Além disso, o bocal reto foi o que apresentou a melhor eficiência energética dentre os três bocais, apresentando assim o melhor desempenho.

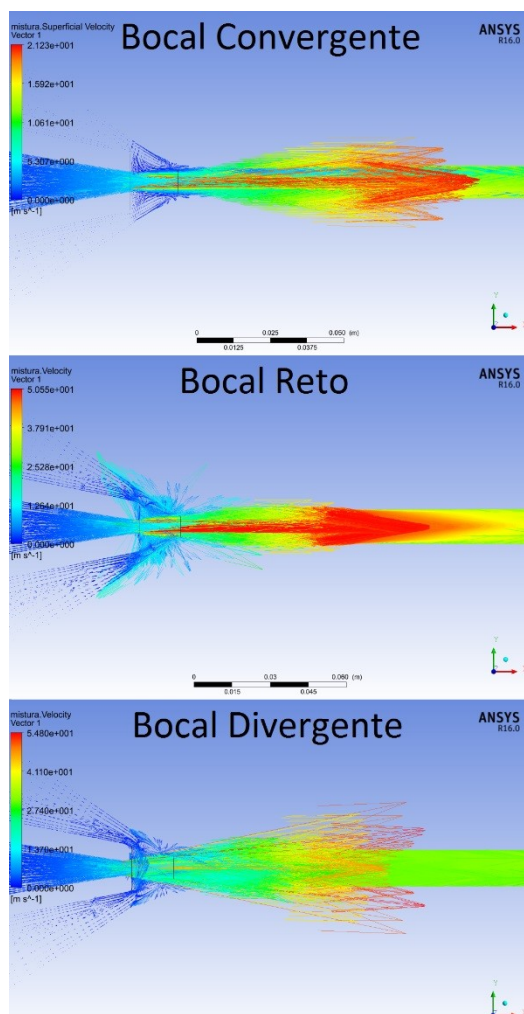


Figura 6: Comportamento dos vetores de velocidade do fluido na saída dos bocais

### 3.5. Convergência da câmara de sucção

Para analisar o formato da convergência da câmara de sucção, também foram considerados três casos: dois em formatos cônicos com ângulos de convergência de 50° e 70°, e um no formato de boca de sino com ângulo de convergência de 70°.

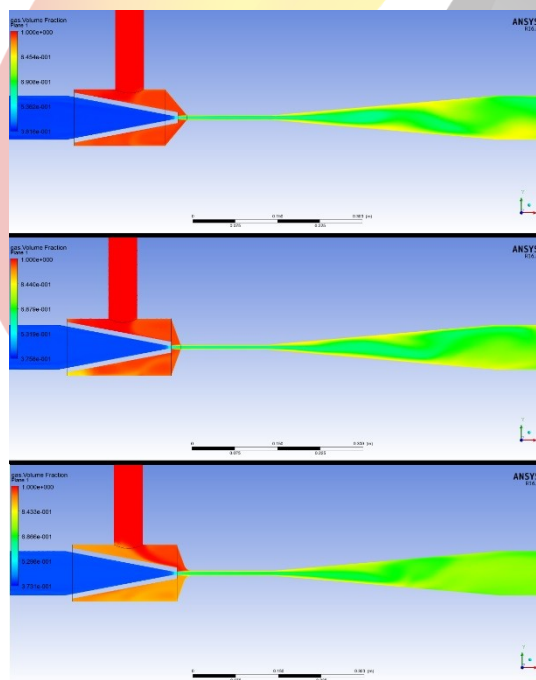


Figura 7: Comportamento da fração volumétrica de gás com diferentes câmaras de sucção

A partir da Figura 7, é notável a diferença entre a FVG nas diversas câmaras de sucção: a Cônica 50° quase não possui líquidos acumulados na câmara, a Cônica 70° já apresenta acúmulo, especialmente na parte inferior traseira, e a Boca de Sino 70° o acúmulo foi significativo, principalmente na parte inferior da câmara. A Figura 8 também confirma essa tese, demonstrando um maior direcionamento dos vetores de velocidade da mistura para a câmara de sucção no modelo Boca de Sino 70°.

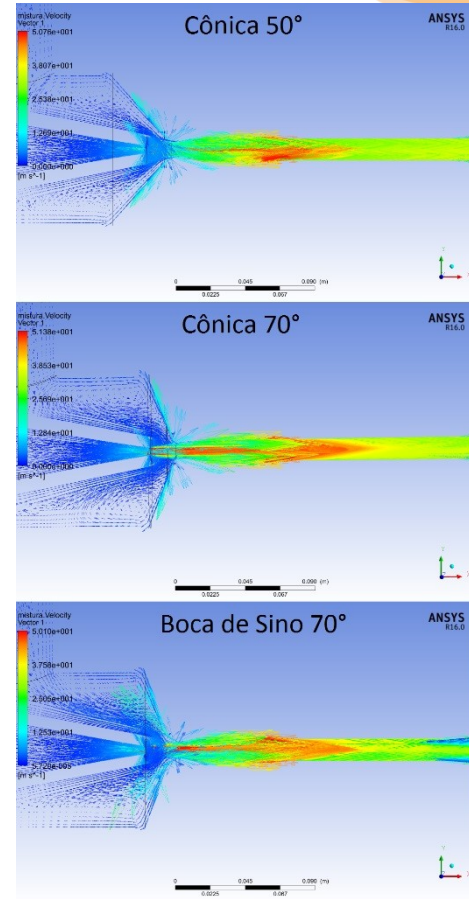


Figura 8: Vetores de velocidade da mistura para diferentes câmaras de sucção

O acúmulo de líquido na câmara de sucção tende a prejudicar o potencial de sucção do equipamento. Neste sentido, o ejetor com câmara de sucção Cônica 50° foi o que apresentou melhor eficiência energética dentre os três casos estudados.

#### 4. CONCLUSÃO

Neste trabalho, foi desenvolvida uma análise da utilização de ejetores para



descompressão do revestimento em poços produtores de petróleo. A análise foi baseada em resultados obtidos no simulador CFX. Ao término das análises preliminares, pode-se sugerir que o ejetor apresenta capacidade de aspirar o gás aprisionado no revestimento, e, conseqüentemente, reduzir a pressão de fluxo no fundo do poço. Para casos similares ao caso estudado, aconselha-se utilizar uma distância entre o bocal e a garganta de aproximadamente duas vezes o diâmetro interno da garganta, pois assim evita-se o acúmulo de líquido na câmara de sucção. Optar por câmaras de sucção pequenas, com seções convergentes cônicas com cerca de 50° com a horizontal, melhoram o desempenho do ejetor. Por fim, utilizar saídas do bocal com seção reta otimiza o direcionamento do jato. Estas análises preliminares produziram resultados satisfatórios, porém, recomenda-se avaliar outras variáveis que venham certamente contribuir para o aperfeiçoamento dos ejetores em poços de petróleo.

## 5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a colaboração da Petrobras.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Referência Digital:

ANSYS, Inc. ANSYS CFX tutorials. Disponível em: <  
<http://orange.engr.ucdavis.edu/Documentation/12.1/121/CFX/xtutr.pdf>>. Data de acesso: 01/02/2016.

Livros:

BROWN, K. E. *The technology of artificial lift methods; electric submersible centrifugal pumps, hydraulic pumping, jet pumping, plunger lift, other methods of artificial lift, planning for and comparison of artificial lift systems (Vol 2b)*. Pennwell Corp, 1982.

GAS PROCESSOR SUPPLIERS ASSOCIATION. *Engineering Data Book*. Tulsa, Oklahoma: GPSA, v. 1 e 2, 12 ed. 2004.

Artigos:

CUNNINGHAM, R. G.: *Gas compression with the liquid jet pump*, Journal of Fluids Engineering (Sep. 1974 a) 203- 214.

CUNNINGHAM, R. G. AND DOPKIN, R.J: *Jet breakup and mixing throat lengths for the liquid jet gas pump*. Trans. ASME, J. Fluids Eng., 1974 b, 96, 216-226.