

12º CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM PETRÓLEO E GÁS



TÍTULO DO TRABALHO:

O Estado da arte na utilização das bombas de cavidade progressivas na elevação artificial.

AUTORES:

Alisom da Silva Farias, Ana Paula do Nascimento Cardoso, Cláudio Regis dos Santos Lucas, Nathalia Almeida Braga, Jéssica Nascimento Pereira

INSTITUIÇÃO:

Universidade Federal do Pará.

O ESTADO ARTE NA UTILIZAÇÃO DAS BOMBAS DE CAVIDADES PROGRESSIVAS NA ELEVAÇÃO ARTIFICIAL

Resumo

As bombas de cavidades progressivas (BCP), projeto original que data de 1930, têm uma importância fundamental na indústria de petróleo e gás, facilitando a extração eficiente de fluidos de poços com características desafiadoras ao longo dos anos, assim como sendo utilizada em outros setores de E&P. Neste resumo acadêmico, examinaremos o cenário histórico e atual da utilização das BCPs, enfatizando suas vantagens e desvantagens, aplicações e os avanços tecnológicos. O BCP é um método indicado, convencionalmente, para produção de óleos leves e pesados, desde que não contenham aromáticos proibitivos e nem elevados teores de areia, sendo especialmente útil em áreas que exigem baixo impacto visual. Nesse tipo de bomba limitações tecnológicas no elastômero ou no adesivo que fixa o elastômero ao tubo estator tendem a restringir sua aplicação convencional a temperaturas de até 100 °C, com vazão de bombeio limitada a 250 m³/dia e capacidade de suportar diferenciais de pressão de até 250kgf/cm². Entre suas vantagens, destacam-se a ausência de válvulas, sujeitas a desgastes, além de significativa resistência à abrasão, alta eficiência energética, baixo ruído e dimensões reduzidas dos equipamentos, comparado a opções diretas de substituição na aplicação. No entanto, suas desvantagens incluem baixa eficiência com elevada RGO (razão gás-óleo), excesso de desgastes e fadiga em poços desviados. As principais aplicações das BCPs são na elevação artificial do petróleo, no manuseio de sólidos e na aplicação em poços com baixa pressão. Os avanços recentes estão ligados à introdução de elastômeros com alta resistência química e térmica com consequente fortalecimento significativo da durabilidade das bombas de cavidades progressivas. Além disso, o aperfeiçoamento no design do rotor e do estator resultou em uma eficiência operacional aprimorada e um aumento significativo entre *workovers*. Os principais desafios a serem superados em relação às BCPs estão relacionados ao desgaste, à corrosão e à adaptação a condições extremas. A tecnologia avança para atender às rigorosas demandas do setor de óleo e gás, com inovações em materiais, melhorias de design e sistemas de monitoramento aprimorados. O investimento constante em pesquisa e desenvolvimento é vital para superar os obstáculos atuais e futuros, mantendo as BCPs como uma solução chave na elevação artificial de óleo e gás.

Palavras-chave: Bombas de cavidades progressivas (BCPs), Extração de fluidos, Indústria de petróleo e gás.

Abstract

Progressive cavity pumps (PCPs), originally designed in 1930, have a fundamental importance in the oil and gas industry, facilitating the efficient extraction of fluids from wells with challenging characteristics over the years, as well as being used in other E&P sectors. In this academic summary, we will examine the historical and current landscape of PCP utilization, emphasizing their advantages and disadvantages, applications, and technological advancements. PCPs are conventionally indicated for the production of light and heavy oils, as long as they do not contain prohibitive aromatics or high

sand content, and are especially useful in areas requiring low visual impact. In this type of pump, technological limitations in the elastomer or the adhesive that fixes the elastomer to the stator tube tend to restrict its conventional application to temperatures of up to 100 °C, with a pumping flow rate limited to 250 m³/day and the capacity to withstand pressure differentials of up to 250 kgf/cm². Among its advantages are the absence of valves, which are subject to wear, as well as significant abrasion resistance, high energy efficiency, low noise, and reduced equipment dimensions compared to direct replacement options in the application. However, its disadvantages include low efficiency with high GOR (gas-oil ratio), excessive wear and fatigue in deviated wells. The main applications of PCPs are in artificial oil lift, solids handling, and application in low-pressure wells. Recent advancements are linked to the introduction of elastomers with high chemical and thermal resistance, significantly strengthening the durability of progressive cavity pumps. Additionally, improvements in rotor and stator design have resulted in enhanced operational efficiency and a significant increase in the intervals between workovers. The main challenges to be overcome regarding PCPs are related to wear, corrosion, and adaptation to extreme conditions. Technology advances to meet the stringent demands of the oil and gas sector, with innovations in materials, design improvements, and enhanced monitoring systems. Constant investment in research and development is vital to overcoming current and future obstacles, maintaining PCPs as a key solution in artificial oil and gas lift.

Keywords: Progressive cavity pumps (PCPs), fluid extraction, oil and gas industry.

Introdução

A elevação de petróleo, também conhecida como elevação artificial, abrange diversas técnicas destinadas a otimizar a produção em poços onde a pressão natural do reservatório é insuficiente para trazer os fluidos à superfície. Cada método de elevação artificial é escolhido com base nas condições específicas do poço e nas características do reservatório. A elevação de petróleo implica no transporte de fluidos do fundo do poço até a superfície. Quando a pressão do reservatório consegue superar as perdas de carga no reservatório, na elevação e na linha de produção que transporta o fluido da cabeça do poço até as instalações de produção, temos a elevação natural. Porém, quando a pressão do reservatório não é suficiente para vencer essas perdas de carga, é necessário adotar um sistema de elevação artificial. Esse sistema pode envolver um mecanismo de bombeamento no fundo do poço que adiciona energia ao fluido na forma de pressão ou um método para reduzir as perdas de carga, como a injeção de gás no fundo do poço. (Assman, 2017)

A indústria petrolífera utiliza vários métodos para elevar o petróleo do poço até a superfície, como injeção de gás (*gas lift*), bombeio centrífugo submerso (BCS), bombeio mecânico com haste (BMH) e bombas de cavidade progressiva (BCP). Estes métodos são essenciais quando a pressão natural do reservatório não consegue levar o petróleo para cima. Conforme Assmann os métodos tradicionais de elevação de petróleo, apesar de eficientes em muitos casos, apresentam limitações que os tornam inadequados para determinadas condições. (2008, p.1)

O método de bombeio de cavidades progressivas (BCP) tem se destacado por sua notável capacidade de superar suas próprias limitações, especialmente diante do imenso potencial de avanço tecnológico que apresenta. No entanto, ainda existem áreas pouco exploradas neste campo, particularmente no que diz respeito à modelagem dinâmica, ao controle automatizado e à supervisão. Estes aspectos ganham ainda mais relevância quando se considera a questão da segurança operacional.

Um fenômeno específico, conhecido como reversão da coluna de hastes ou "*back-spin*", tem sido responsável por acidentes graves, ressaltando a importância de se aprofundar os estudos e desenvolver soluções nessas áreas ainda não totalmente dominadas.

Segundo Assmann (2008, p.2), que cita Matthews et al. (2002) e Moineau (1930):

"A versatilidade da Bomba de Cavidade Progressiva (BCP) a tornou o método de elevação de petróleo mais popular em todo o mundo. A BCP, instalada no fundo do poço, é responsável pela ação de bombeio do petróleo."

Metodologia

Para realizar esta pesquisa, foi feita uma revisão sistemática da literatura. As bases de dados ScienceDirect, Portal de Periódicos da Capes e Google Acadêmico® foram consultadas utilizando as palavras-chave "*Progressive cavity pumps*", "*Oil artificial lift*" e "*Fluid extractio*". Os artigos selecionados foram escolhidos com base em seus títulos e resumos, focando nos que se encaixavam na temática da pesquisa. A partir das referências bibliográficas dos artigos selecionados, outras publicações relevantes também foram incluídas na revisão

Resultados e Discussão

A elevação artificial é um conjunto de técnicas e tecnologias projetadas para otimizar a produção de petróleo e gás em poços onde a pressão natural do reservatório não é suficiente para trazer o fluido à superfície. Esse processo é crucial para a manutenção e aumento da produção ao longo da vida útil do poço, especialmente à medida que a pressão do reservatório diminui ao longo do tempo. Os principais métodos de elevação artificial incluem técnicas mecânicas e de injeção de gás, cada uma adequada a diferentes condições de poços e tipos de reservatórios. Entre os métodos mais utilizados estão o bombeio mecânico, o bombeio centrífugo submerso (ESP), o gás *lift*, o bombeio de cavidades progressivas (BCP) e o *plunger lift*. A escolha do método apropriado depende de diversos fatores, como as características do reservatório, a composição dos fluidos, a profundidade do poço e a viabilidade econômica.

Em 1930, o engenheiro francês René Moineau desenvolveu a bomba de cavidade progressiva (BCP) como parte de sua tese de doutorado. Moineau introduziu o princípio de operação de um rotor helicoidal acoplado a um estator, o que permite a movimentação contínua e suave de fluidos, incluindo aqueles com alta viscosidade e sólidos em suspensão. Inicialmente, essas bombas foram empregadas em indústrias para o manejo de fluidos espessos e lodos, devido à sua capacidade de lidar com diversas viscosidades e conteúdos sólidos. A partir das décadas de 1950 e 1960, a indústria petrolífera começou a adotar as BCPs para elevação artificial, reconhecendo sua eficácia em bombear fluidos viscosos e lidar com sólidos, o que se revelou particularmente útil em poços com óleo pesado e altos níveis de areia.

Ao longo das décadas, as BCPs passaram por significativas inovações. Nas décadas de 1970 e 1980, novos materiais e melhorias no design aumentaram a durabilidade e a eficiência das bombas. A introdução de elastômeros para estatores e materiais mais resistentes para rotores possibilitou a aplicação das BCPs em condições mais adversas. Durante os anos 1990 e 2000, a integração com tecnologias de automação e monitoramento possibilitou a instalação de sensores e sistemas de controle, permitindo o

monitoramento em tempo real e a otimização da produção. Nas últimas décadas, a aplicação de inteligência artificial e machine learning trouxe avanços significativos, permitindo a previsão de falhas e ajustes automáticos dos parâmetros operacionais, maximizando a eficiência e minimizando o tempo de inatividade.

As BCPs são amplamente utilizadas em diversas aplicações industriais. Elas são eficazes no bombeamento de fluidos viscosos, em poços com alta produção de sólidos e em poços com alta razão água/óleo, onde a presença de água pode causar problemas para outras tecnologias de elevação artificial. Além disso, são adequadas para condições de baixa pressão de reservatório e adaptam-se a diferentes ambientes operacionais, tanto *onshore* quanto *offshore*.

O funcionamento das BCPs baseia-se no princípio de deslocamento positivo. Elas utilizam uma estrutura composta por dois componentes principais: o rotor e o estator. O rotor é uma peça helicoidal metálica que gira dentro do estator, que pode ser fabricado em elastômero ou metal e possui uma cavidade helicoidal que complementa a forma do rotor. Quando o rotor gira dentro do estator, forma cavidades progressivas que se movem ao longo do comprimento da bomba, criando cavidades seladas que deslocam o fluido de uma extremidade da bomba para a outra. Esse movimento contínuo do rotor força o fluido a avançar através das cavidades, proporcionando uma elevação eficiente e contínua. A bomba de cavidades progressivas é uma solução econômica de elevação artificial que simplifica a produção e resiste ao ataque erosivo. Estima-se que atualmente cerca de 50.000 poços em todo o mundo utilizam BCPs.

Desde sua introdução na indústria do petróleo em 1936, a BCP evoluiu consideravelmente. Inicialmente, a bomba utilizava borracha nitrílica para o estator e aço cromado para o rotor, ambos com design helicoidal, mas essa configuração apresentava desgaste rápido do rotor. Em 2002, a BCP foi aprimorada com a introdução de estatores feitos de materiais compostos resistentes ao desgaste e rotores revestidos com poliuretano. O poliuretano (PU), desenvolvido na década de 1940 pelo químico Otto Bayer, oferece uma resistência superior ao desgaste e melhores propriedades mecânicas em comparação com a borracha nitrílica. Essa modificação trouxe benefícios significativos, como o aumento da durabilidade do estator e a eliminação da necessidade de remoção do tubo para manutenção. O PU combina as vantagens de metais, plásticos e cerâmicas, com a flexibilidade da borracha, apresentando alta resistência à abrasão, resistência a cortes e impactos, grande durabilidade, capacidade de suportar cargas elevadas, resistência a fungos e boas propriedades elétricas e de atrito. Essas qualidades fazem do poliuretano um material ideal para aplicações que exigem alto desempenho e resistência, como na fabricação de bombas de alta pressão. Atualmente, de acordo com a Agência Nacional do Petróleo (ANP), cerca de 8.057 poços estão em operação no Brasil, dos quais 806 utilizam métodos BCP, conforme ilustrado no Gráfico 1:

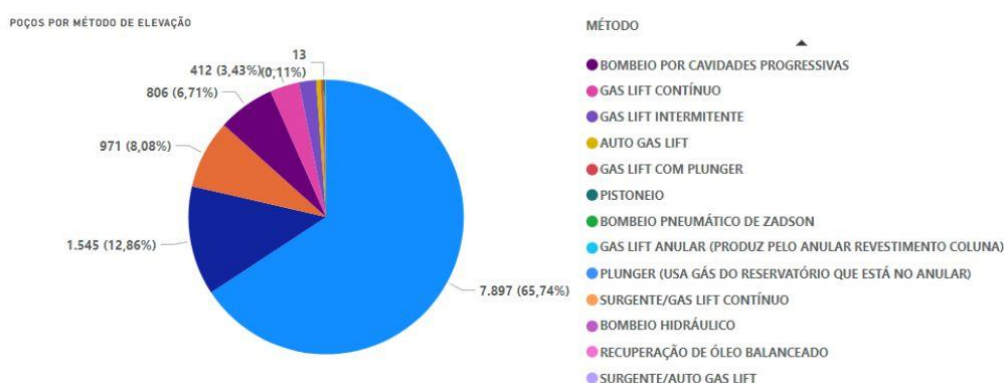


Gráfico 1 - Poços por método de elevação. Fonte: Agência Nacional do Petróleo (ANP), 2024.

Apesar das vantagens das BCPs, algumas limitações devem ser consideradas. Embora sejam capazes de lidar com sólidos, as BCPs podem sofrer desgaste prematuro nos estatores devido a partículas abrasivas, especialmente em estatores de elastômero, que também têm limitações em temperaturas elevadas. A utilização de estatores metálicos pode mitigar esse problema, mas com um custo mais elevado. A eficiência das BCPs pode ser comprometida por variações na viscosidade do fluido bombeado, e elas requerem manutenção regular para substituição de componentes desgastados, como estatores e rotores, o que pode aumentar os custos operacionais ao longo do tempo. A instalação das BCPs pode ser complexa e demorada, especialmente em poços horizontais ou com geometrias complexas, exigindo mão de obra especializada. Além disso, as BCPs não são ideais para poços com alta produção de gás livre, pois a presença de gás pode induzir cavitação, reduzindo a eficiência e potencialmente causando danos ao equipamento.

Os desafios técnicos enfrentados pelas BCPs incluem o volume máximo produzido, a altura máxima de elevação, a temperatura máxima de operação e o teor admissível de hidrocarbonetos aromáticos. Problemas como o bombeamento a seco, onde o gás passa pela bomba, podem causar atrito e sobrecarga nas hastes dos bombeadores mecânicos em poços desviados, resultando em desgastes e falhas prematuras. Para superar essas limitações, são necessários métodos robustos de controle de produção, que incluem a coleta e análise contínuas de dados para identificar e eliminar fontes de falhas e desperdícios, garantindo a eficiência e a qualidade da produção. Referências recentes destacam a importância de designs personalizados e inovações, como selos mecânicos adaptados e sistemas de rotor/estator aprimorados, para melhorar a confiabilidade e reduzir a necessidade de intervenções frequentes.

Outro aspecto crítico é o acionamento das BCPs. Atualmente, a maioria dos poços utiliza hastes de bombeio mecânico para acionar a bomba de fundo. No entanto, o uso de hastes apresenta inconvenientes, como o atrito com a parede dos tubos, especialmente em desvios ou "*dog legs*", e problemas exacerbados pela presença de areia ou fluidos corrosivos, como água salgada. Esse atrito pode resultar em hastes quebradas e tubos perfurados. Além disso, a fadiga das hastes pode ocorrer na presença de desvios, e essas não são adequadas para poços marítimos devido à redução da área aberta ao fluxo, aumentando as perdas por atrito e limitando a profundidade máxima de instalação da bomba.

Devido a esses inconvenientes, alternativas ao acionamento com hastes têm sido estudadas, como a haste contínua, semelhante a um arame espesso com o comprimento do poço; o BCP com acionamento elétrico de fundo, que utiliza um motor elétrico acoplado e elimina a necessidade de hastes; e o BCP com acionamento hidráulico, onde um líquido é bombeado para girar a bomba.

Nos últimos anos, a indústria de perfuração tem enfrentado novos desafios devido à exploração de recursos em condições extremas, como perfuração geotérmica ultra-profunda, extração de gás de xisto e exploração de petróleo offshore. Empresas como *SEEPEx GmbH*, *Schlumberger NV*, *NOV Inc.* e *CIRCOR International, Inc.* destacam-se pela inovação e qualidade superior, oferecendo tecnologias que se destacam na transferência de fluidos de baixa viscosidade, abrasivos e sensíveis ao cisalhamento. Esses desafios têm impulsionado o desenvolvimento de ferramentas de perfuração capazes de operar em ambientes de alta temperatura. Motores de cavidade progressiva tradicionais, quando expostos a temperaturas superiores a 180 °C, enfrentam problemas como envelhecimento e degradação do estator de borracha, resultando na falha do motor. Para superar essas limitações, surgiu a alternativa o motor de

ímã permanente, uma variante especializada de motor elétrico, foi testado em agosto de 2013 em San Joaquin Valley, California, e na Austrália Ocidental, em poços voltados para a produção de óleo pesado e a deliquação de gás.

Este novo sistema, que se adapta à coluna convencional encaixada, requer menos equipamentos e resolve problemas comuns em poços horizontais e na manipulação de areia. Ele é altamente eficaz em aplicações como deliquação de poços de gás, injeção cíclica de vapor e produção de óleo pesado com areia, diminuindo a necessidade de energia e instalações elétricas de superfície caras em comparação com o BCS. Além disso, a configuração reduz o impacto ambiental e os requisitos para desenvolvimento e *workover*, resultando em operações mais seguras e menos complexas.

O conversor de torque aumenta o torque do motor e possibilita a operação do BCP em baixas rotações (entre 100 e 500 RPM), melhorando a eficiência do sistema. A combinação do motor de ímã permanente (PMM) com o conversor de torque permite uma configuração de diâmetro reduzido, gerando torque eficiente e minimizando perdas na transmissão. A eliminação do sistema de superfície evita vazamentos associados aos sistemas de vedação dinâmicos usados em hastes convencionais, e o conversor de torque magnético e sem contato reduz perdas e elimina falhas comuns em sistemas de transmissão tradicionais, como obstruções e desgaste de engrenagens.

Conclusões

O estudo sobre elevação artificial na produção de petróleo, com foco no Bombeamento de Cavidade Progressiva (BCP), destaca a importância desta técnica para otimizar a produção em poços com baixa pressão de reservatório. O BCP é uma solução robusta e amplamente empregada na indústria de petróleo e gás, especialmente para lidar com fluidos viscosos e sólidos em poços com óleo pesado e alta produção de sólidos. Baseado no princípio de deslocamento positivo, o BCP assegura uma taxa de fluxo constante, mas enfrenta desafios técnicos, como limitações no volume e altura de elevação, desgaste prematuro dos estatores e a necessidade de manutenção regular. Esses desafios elevam os custos operacionais e demandam estratégias avançadas de controle e tecnologias inovadoras para garantir a eficiência e confiabilidade do sistema. Inovações como novos materiais para estatores, sistemas aprimorados de rotor/estator e a integração com automação e inteligência artificial têm contribuído para melhorar a eficiência e a durabilidade das BCPs.

Recentemente, a introdução de motores de cavidade progressiva totalmente metálicos tem mostrado ser uma solução promissora para enfrentar condições extremas, como altas temperaturas e ambientes corrosivos, oferecendo maior resistência e durabilidade. No entanto, esses motores ainda enfrentam desafios, como vazamentos entre as partes metálicas. A análise crítica enfatiza a importância de um controle rigoroso da produção, apoiado na coleta e análise contínuas de dados, para identificar e mitigar falhas operacionais que impactam a eficiência e os custos do poço. O investimento contínuo em pesquisa e desenvolvimento é crucial para superar as limitações das técnicas atuais e garantir a eficácia do BCP como um método versátil de elevação artificial.

Em resumo, a evolução tecnológica e a adaptação às novas condições de operação são essenciais para otimizar a produção e garantir a sustentabilidade das operações de elevação artificial. As BCPs, com suas capacidades e desafios, permanecem uma solução vital para a indústria de petróleo e gás, e seu aprimoramento contínuo assegura sua relevância e eficácia em cenários de produção atuais e futuros.

Agradecimentos

Gostaríamos de expressar nossa sincera gratidão à Universidade Federal do Pará (UFPA) e à Pró-Reitoria de Extensão (PROEX) pelo fornecimento de recursos e de um ambiente propício para a realização desta pesquisa. Sem o suporte institucional e os recursos disponibilizados, este trabalho não teria sido possível.

Referências Bibliográficas

AGARWAL, Soham; et al. "PCPs Coming of Age as a Viable Artificial Lift Solution for Low API Crude Fields." Paper presented at the SPE Middle East Oil & Gas Show and Conference, Manama, Bahrain, March 2015. doi: <https://doi.org/10.2118/172686-MS>

ASSMANN, Benno Waldemar. Estudo de estratégias de otimização para poços de petróleo com elevação por bombeio de cavidades progressivas. 2008. 248 f. Tese (Doutorado em Automação e Sistemas; Engenharia de Computação; Telecomunicações) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2008.

Assmann, B. W.; Salazar, A. O.; Vidal, F. J. T.; Ferreira, J. Implementação de Controlador Pi-Fuzzy para Sistema de Elevação Artificial de Óleo por Bomba de Cavidade Progressiva. *IEEE Latin America Transactions*, v. 15, n. 2, p. 263-268, fev. 2017. doi: 10.1109/TLA.2017.7854621

BAO, F et al. The application of ESPCP in CHINA offshore oilfield. Spe Progressing Cavity Pumps Conference, [S.I.], p.1-7, 2010. Society of Petroleum Engineers (SPE). <http://dx.doi.org/10.2118/136816-ms>.

CHOLET, Henri. Progressing cavity pumps. Editions Technip, 1997.

DE CARVALHO, Paulo Cesar Gasse. Gerenciamento do bombeio de cavidades progressivas. 1999. Tese de Doutorado.

FERNANDEZ, A. Challenges in Progressive Cavity Pumps: A Comprehensive Review. *Journal of Petroleum Technology*, v. 68, n. 4, p. 37-45, 2019. Disponível em: <<https://www.onepetro.org/journal-paper/SPE-169835-PA>>. Acesso em: 08 jul. 2024.

LEHMAN, M. Progressing cavity pumps in oil and gas production, *World Pumps*, Volume 2004, Issue 457, 2004, Pages 20-22.

LU, Jiaying; et al. Analysis of output performance of all-metal progressive cavity motor, *Geoenery Science and Engineering*, Volume 222, 2023.

MALI, Prasanna; et al. "Evaluation of AMPCP in KOC Heavy Oil Reservoir." Paper presented at the SPE Progressing Cavity Pumps Conference, Calgary, Alberta, Canada, August 2013. doi: <https://doi.org/10.2118/165653-MS>

Progressive Cavity Pumps for Challenging Oil & Gas Applications | Pumps & System. Disponível em: <<https://www.pumpsandsystems.com/progressive-cavity-pumps-challenging-oil-gas-applications.>> Acesso em: 07 jul. 2024.

REIS, I. F. Bombeio de Cavidades Progressivas: Aplicações e Limitações. Rio de Janeiro: Editora Oil & Gas, 2015.

RUSHBY, M. J; DENHOLM, A. Field Trial Results of an Innovative ES-PCP System. Spe Progressing Cavity Pumps Conference, [S.l.], p.1-11, Aug. 2013. Society of Petroleum Engineers (SPE). <http://dx.doi.org/10.2118/165648-ms>.

SMITH, J. P. Advanced Pumping Techniques in Oil and Gas Production. Houston: Petroleum Publishing, 2017.

THOMAS, J. E. Fundamentos da engenharia de petróleo. 2. ed. Rio de Janeiro, RJ: Interciência, 2004.

Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP). Painel de Poços na Fase de Produção. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/paineis-dinamicos-da-anp/paineis-dinamicos-sobre-exploracao-e-producao-de-petroleo-e-gas/painel-de-pocos-na-fase-de-producao>. Acesso em: 30 ago. 2024.

Schlumberger (SLB). Defining PCP. Disponível em: <https://www.slb.com/resource-library/oilfield-review/defining-series/defining-pcp>. Acesso em: 30 ago. 2024.

Mingjie Pump. Top 17 Progressive Cavity Pumps Manufacturers in the Industry. Disponível em: <https://www.mingjiepump.com/pump-selection/top-17-progressive-cavity-pumps-manufacturers-in-the-industry/>. Acesso em: 30 ago. 2024.