



Artigo de Revisão

e-ISSN 2177-4560

DOI: 10.19180/2177-4560.v15n12021p99-124

Submetido em: 03 fev. 2021

Aceito em: 24 ago. 2021

.....
Métodos alternativos para otimização e reaproveitamento energético em sistemas de bombeio mecânico de hastes na indústria de petróleo: um estudo bibliométrico

Leandro Ferreira Souza  <https://orcid.org/0000-0003-4944-6911>

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Fluminense.

Mestrando em Engenharia Ambiental. Instituto Federal Fluminense. E-mail: LEANDRO_UENF@YAHOO.COM.BR

Resumo: O processo de extração de petróleo consome muita energia elétrica e isto aumenta os custos de produção. O sistema de bombeio mecânico de hastes representa cerca de 85% dos sistemas de elevação usados na produção de campos onshore. Este artigo objetiva investigar o que está sendo discutido sobre métodos alternativos para otimização e reutilização energética para estes sistemas. Para isso, conduziu-se um estudo bibliométrico para investigar a relação entre reaproveitamento energético e as unidades de bombeio mecânico com hastes na indústria do petróleo. O número de artigos publicados encontrados foi bem reduzido, o que sugere um assunto que ainda carece de muitas pesquisas. Mesmo assim, foi possível identificar algumas tendências de estudos, como a inserção de molas no sistema para armazenar energia potencial elástica, além de acompanhar a discussão sobre as formas eficazes de reciclagem de energia, cujo desenvolvimento sugere a avaliação de fontes secundárias de energia e o uso de fontes renováveis de energia como etapas que devem ser executadas. Foi possível compreender que os estudos nessa área possuem projeção de aumentar e que alguns novos sistemas já estão sendo testados.

Palavras-chave: Fontes secundárias de energia. Recuperação de energia. Poços de Petróleo

Alternative methods for energy optimization and reuse in rod pumping systems in the oil industry: a bibliometric study

Abstract: The oil extraction process consumes a lot of electricity and this increases production costs. The mechanical rod pumping system represents about 85% of the lifting system used in the production of onshore oil fields. This article aims to investigate what is being discussed about alternative methods for energy optimization and energy reuse for these systems. For this, a bibliometric study was conducted to investigate the relationship between energy reuse and mechanical pumping units with rods in the oil industry. The number of published articles found was very small, which suggests a subject that still lacks much research. Even so, it was possible to identify some trends in studies, such as the insertion of springs in the system to store elastic potential energy, in addition to following the discussion on effective forms of energy recycling, whose development suggests the evaluation of secondary energy sources and the use of renewable energy sources as steps to be taken. It was possible to understand that studies in this area are projected to increase and that some new systems are already being tested.

Keywords: Secondary energy sources. Energy reuse. Oil wells.

Métodos alternativos para la optimización y reutilización de energía en sistemas mecánicos de bombas de bombeo de barras en la industria petrolera: un estudio bibliométrico

Resumen: El proceso de extracción de petróleo consume mucha electricidad y esto aumenta los costos de producción. El sistema mecánico de bombas de bombeo de barras representa aproximadamente el 85% de los sistemas de elevación utilizados en la producción de campos en tierra. Este artículo tiene como objetivo investigar lo que se está discutiendo sobre métodos alternativos para la optimización y la reutilización de energía para estos sistemas. Para ello, se realizó un estudio bibliométrico para investigar la relación entre la reutilización de energía y las unidades de bombeo mecánico en la industria petrolera. El número de artículos

publicados encontrados fue muy reducido, lo que sugiere un tema al que todavía le falta mucha investigación. Aun así, fue posible identificar algunas tendencias en los estudios, como la inserción de resortes en el sistema para almacenar energía elástica potencial, además de seguir la discusión sobre formas efectivas de reciclaje de energía, cuyo desarrollo sugiere la evaluación de fuentes secundarias de energía y el uso de fuentes renovables de energía como pasos que deben tomarse. Además, se pudo entender que se proyecta un incremento de los estudios en esta área y que ya se están probando sistemas nuevos.

Palabras clave: Fuentes de energía secundaria. Recuperación de energía. Pozos de petróleo

1 Introdução

A discussão em torno do uso racional de energia tem sido um tema relevante na sociedade. Seja para o bem-estar da população ou para o crescimento / desenvolvimento econômico, a energia é indispensável. Economizar energia ou reutilizá-la contribui para a redução da poluição (SUDITU *et al.*, 2019).

Com o crescimento da população e da economia mundial, a pressão ambiental aumentou, já que muitos dos principais bens e serviços do ecossistema têm sido degradados ou usados de forma insustentável (MIHELIC *et al.*, 2017).

As questões de energia tiveram uma influência significativa na dinâmica da legislação de vários países. No que diz respeito à política de eficiência energética, alguns dos aspectos mais importantes referem-se a: reduzir o impacto ambiental das atividades industriais; promover mecanismos de eficiência energética e instrumentos financeiros de poupança de energia; educar e sensibilizar os consumidores finais para a importância e benefícios da implementação de medidas de melhoria da eficiência energética; introduzir tecnologias de alta eficiência energética, modernos sistemas de medição e controle, bem como sistemas de gestão de energia para avaliação e monitoramento contínuo da eficiência energética e previsão do consumo de energia; além de aplicar os princípios modernos de gestão de energia (SUDITU *et al.*, 2019).

O petróleo é uma das fontes tradicionais de energia mais importantes do mundo, desempenhando um papel relevante na vida moderna. No entanto, o processo de extração de petróleo consome muita energia elétrica e aumenta os custos de produção (ZHANG *et al.*, 2020).

Nos campos petrolíferos, métodos de elevação artificial são utilizados por meio de equipamentos mecânicos, que correspondem aos principais elementos de consumo de energia. O sistema de bombeio mecânico de hastes representa cerca de 85% do sistema de elevação usado na produção de campos de petróleo *onshore* no mundo (MENG *et al.*, 2017).

O consumo de energia da unidade de bombeio é responsável por 1/3 do consumo total de energia em campos de petróleo (ZHANG *et al.*, 2020).

Esses equipamentos são compostos basicamente de uma unidade de bombeio, haste polida e um motor, conforme ilustrado na Figura 1. Em meados da década de 1920, a Lufkin, uma empresa dos Estados Unidos, produziu a primeira unidade de bombeio do mundo. Nesse sistema, um motor assíncrono de corrente alternada (CA) foi utilizado para dar energia à bomba de subsuperfície para assim, elevar o petróleo

do fundo do poço. Este sistema apresenta diversas vantagens, como parte estrutural simples, alta confiabilidade e fácil manutenção (MENG *et al.*, 2017).

Figura 1: Esquema mecânico de uma unidade de bombeio convencional



Fonte: GALVÃO *et al.*, 2018

No entanto, o sistema possui algumas desvantagens, como baixa eficiência (em torno de 15% a 20%) e alto consumo de energia. Geralmente requer grande momento de inércia para o seu funcionamento inicial. Além disso, a carga do sistema de bombeio não é igual no curso ascendente e descendente. Numa tentativa de solucionar esses problemas, vários sistemas de bombeio foram introduzidos por pesquisadores. Relata-se que essas ações têm contribuído com uma melhor eficiência, mas não conseguem resolver todas as carências (MENG *et al.*, 2017).

Para exemplificar a importância dessas pesquisas, dados revelam que pelo menos 100.000 unidades dessa modalidade estão em uso atualmente na China. A capacidade total instalada pode ser até 3500 MW e o consumo é normalmente superior a 1000 GWh por ano. Portanto, é essencial realizar estudos sobre tecnologia de economia de energia para essas unidades. No entanto, essas pesquisas, em campos de petróleo, estão focadas principalmente em como aumentar a eficiência do eletromotor. Com o desenvolvimento de

outras tecnologias, o uso de novas fontes de energia em campos de petróleo será uma nova direção de economia de energia (ZHANG *et al.*, 2020).

Diante de todas essas constatações, este artigo objetiva investigar o que está sendo discutido sobre a otimização e a reutilização energética em sistemas de bombeio com hastes.

O desafio inicial quando se pretende estudar um tema é reunir o conhecimento antecedente sobre determinado assunto, levando em consideração o que há de mais contemporâneo, e assim, poupar tempo de pesquisa e usar, licitamente, o que já foi produzido cientificamente por outros pesquisadores.

A bibliometria ocupa-se em nortear este tipo de análise sistemática e criteriosa para constatar e apresentar as publicações acadêmicas pertinentes do objeto de estudo (BRETAS, 2018).

Araújo (2006) defende, na técnica bibliométrica, a utilização de métodos quantitativos para avaliar objetivamente a produção científica.

2 Método

Conduziu-se um estudo bibliométrico para investigar a relação entre reaproveitamento energético e as unidades de bombeio mecânico com hastes na indústria do petróleo.

Uma pesquisa documental foi feita inicialmente com a intenção de seccionar os artigos mais relevantes para o tema em estudo. Para isso, foi utilizado o Portal de Periódicos da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), uma biblioteca virtual que reúne e disponibiliza a instituições de ensino e pesquisa no Brasil o melhor da produção científica internacional, contando com um acervo de mais de 45 mil títulos com texto completo, 130 bases referenciais, 12 bases dedicadas exclusivamente a patentes, além de livros, enciclopédias e obras de referência, normas técnicas, estatísticas e conteúdo audiovisual (PERIÓDICOS CAPES/MEC, 2020).

Inicialmente, foram estabelecidas três palavras chaves para compor a *string* de busca: *energy reuse*, *oil industry* e *rod pumping system*. Os termos correlatos de cada uma dessas palavras foram escolhidos, conforme listado na Tabela 1 e consonantes ao foco desse trabalho.

Tabela 1: Termos usados na busca

Termo 1: "energy reuse" (reaproveitamento de energia)	Termo 2: "oil industry" (indústria do petróleo)	Termo 3: "rod pumping system" (bombeio mecânico de hastes)
<i>energy recycling</i>	<i>oil</i> <i>petroleum</i>	<i>beam pumping system</i> <i>electric motors</i> <i>onshore facilities</i> <i>rod pump</i>

Fonte: Autores (2021)

Como critério de busca, a pesquisa sistemática foi realizada no título, nas palavras-chave e no resumo dos artigos, nos últimos dez anos, da seguinte forma: "*energy reuse*" OR "*energy recycling*",

("energy reuse" OR "energy recycling") AND ("oil industry" OR "oil" OR "petroleum"), ("energy reuse" OR "energy recycling") AND ("rod pumping system" OR "beam pumping system" OR "electric motors" OR "onshore facilities" OR "rod pump"), "oil industry" OR "oil" OR "petroleum", ("oil industry" OR "oil" OR "petroleum") AND ("rod pumping system" OR "beam pumping system" OR "electric motors" OR "onshore facilities" OR "rod pump"), "rod pumping system" OR "beam pumping system" OR "electric motors" OR "onshore facilities" OR "rod pump" e ("energy reuse" OR "energy recycling") AND ("oil industry" OR "oil" OR "petroleum") AND ("rod pumping system" OR "beam pumping system" OR "electric motors" OR "onshore facilities" OR "rod pump").

Os artigos que mais se aproximaram do estudo em questão foram selecionados.

Como a busca no Portal Periódicos Capes é bem abrangente, decidiu-se restringir as buscas numa base de dados específica para comparar os resultados. A base de dados escolhida foi a WOS – *Web Of Science*, que também possui elevada abrangência.

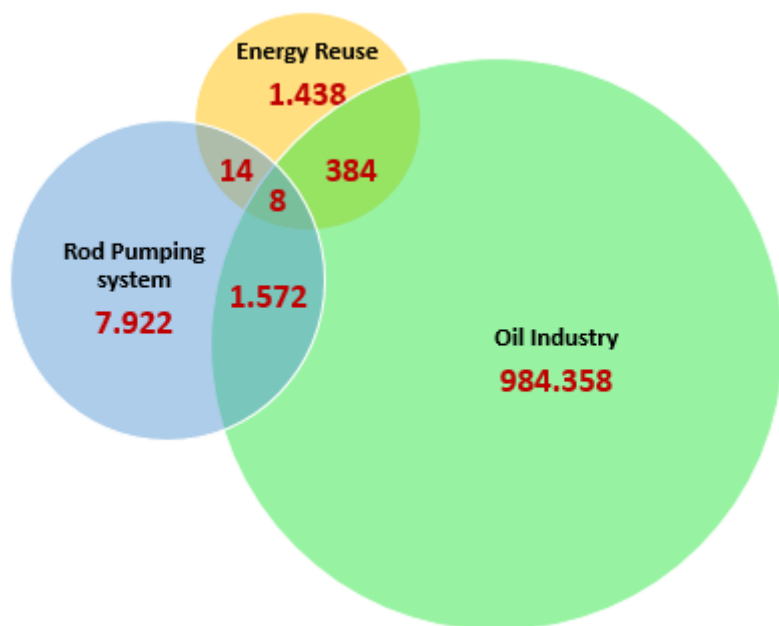
Depois disso, utilizou-se a ferramenta Biblioshiny®, baseada no ambiente de programação R-Studio®, com o objetivo de realizar uma análise mais detalhada dos artigos.

Finalmente, foi feita também uma pesquisa em patentes brasileiras que apresentam propostas de tecnologias relacionadas a esse tema.

3 Resultados e Discussão

Apesar das bases de dados no Portal Periódico Capes serem consideravelmente extensivas, ao aplicar a *string* de busca resultante da concatenação dos termos mencionados na Tabela 1, obteve-se apenas uma interseção de 8 artigos, retratados na Figura 2.

Figura 2: Diagrama Venn dos artigos encontrados



Fonte: Autores (2021)

Dentre esses 8 artigos, de fato, apenas três tinham assuntos correlatos à proposta desta pesquisa, relacionados na Tabela 3, indicando o quão incomum é o assunto. Por esta razão, os outros cinco artigos foram eliminados.

Tabela 2: Artigos mais relevantes para este estudo

ARTIGO	TÍTULO
1	An energy-saving pumping system with novel springs energy storage devices
2	Factors Influencing the Enhancement of Energy Efficiency in the Oil and Gas Industry
3	Experiments and Simulation on a Late-Model Wind-Motor Hybrid Pumping Unit

Fonte: Autores (2021)

Aplicando-se tal *string* à base WOS, nenhum resultado foi encontrado. Por esta razão, acrescentou-se ao conjunto da *string* os termos *energy saving*, *optimization* e *hybrid*, com o objetivo de ampliar a discussão: além da questão de reaproveitamento energético no bombeio mecânico por meio de modificações no sistema para reutilizar a energia desperdiçada, discutir também a otimização do sistema, enfatizando a utilização de fontes alternativas e/ou renováveis de energia, cuja origem seja externa ao sistema de bombeio.

Mais uma vez, a pesquisa sistemática foi realizada no título, nas palavras-chave e no resumo dos artigos, nos últimos dez anos, da seguinte forma: (“energy saving” OR “optimization” OR “energy reuse” OR “energy recyclin” OR “hybrid”) AND (“oil industry” OR “oil” OR “petroleum”) AND (“rod pumping system” OR “beam pumping system” OR “rod pump”).

O resultado listou 73 periódicos revisados por pares no período de 2011 a 2021, sendo que apenas mais 2 publicações apresentaram textos relativos ao tema de estudo, conforme relacionados na Tabela 3. Isso porque o termo “*optmization*” nas buscas relacionadas ao bombeio mecânico não têm relação nenhuma com reaproveitamento de energia. A grande maioria dos artigos apresentavam propostas de otimização do equipamento baseando-se em diagnósticos operacionais e simulações numéricas para alterações no design e melhorias de parâmetros elétricos obtidos em cartas dinamométricas.

Tabela 3: Mais artigos relevantes para este estudo

ARTIGO	TÍTULO
1	Optimal sizing and techno-economic analysis of a renewable power system for a remote oil well.
2	An Energy Saving System for a Beam Pumping Unit

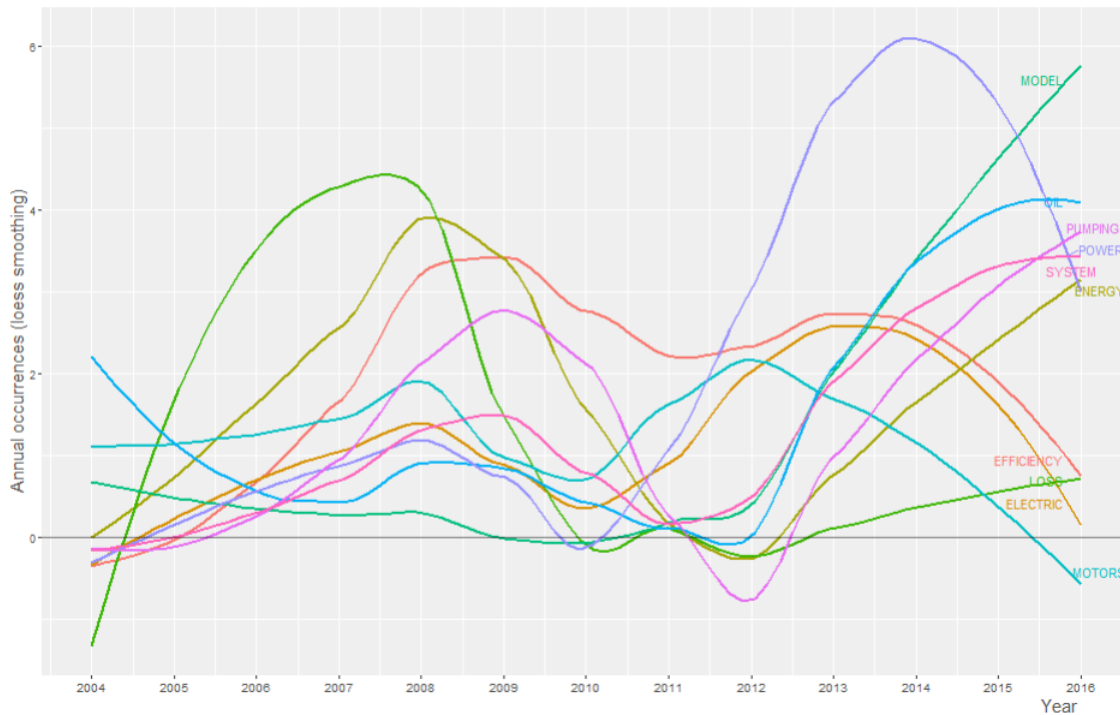
Fonte: Autores (2021)

Ao analisar os resultados na ferramenta Bibliometrix®, notou-se que as palavras chaves mais frequentes não eram compatíveis com o que fora definido na busca, como ilustrado na Figura 3, conhecida como *word cloud*. Isso se deu por causa do número bem reduzido de produção científica relacionada ao tema aqui proposto.

Figura 3: *Word cloud* das palavras chaves encontradas

Por fim, a Figura 5 mostra o desenvolvimento, ao longo do tempo, da terminação científica relacionada à essas palavras-chave, indicando a frequência dos principais termos encontrados neste estudo. Como pode ser visto, o termo “*model*” está em ascensão, enquanto os termos “*motors*” e “*power*” estão em declínio.

Figura 5: Evolução quantitativa dos principais termos chave



Fonte: Autores (2021)

Dado o exposto, pode-se afirmar que a estratégia de utilizar a base de dados da *Web Of Science* para confrontar os resultados obtidos na pesquisa feita no Portal Periódico Capes não foi satisfatória, uma vez que os termos chaves definidos para uma interseção possuem um número tão reduzido que nem aparecem na base de dados da WOS.

Para compensar este número reduzido de artigos, também foi feita uma busca no site do Instituto Nacional da Propriedade Industrial (INPI), na base patentes, usando a palavra-chave unidade de bombeio (no título e no resumo) e assim, foram encontrados 27 resultados. Desses, apenas dois estavam relacionados com o conteúdo desta pesquisa, conforme relacionados na Tabela 4. Os outros eram patentes para melhoramento do sistema, visando a otimização do funcionamento da unidade.

Tabela 4: Patentes relevantes para este estudo

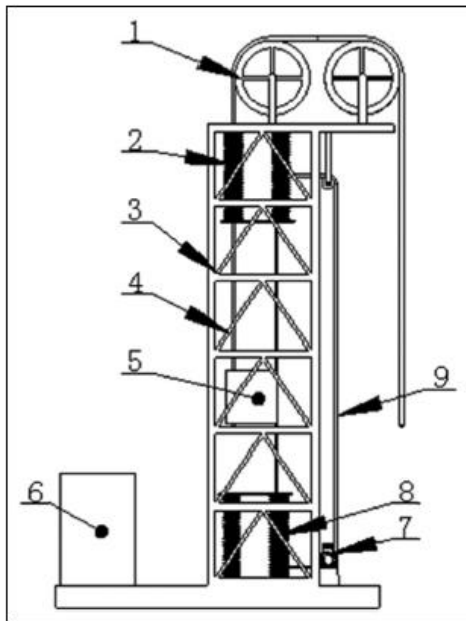
PATENTE	TÍTULO
1	Unidade de bombeio eólica. Depositante: Petróleo Brasileiro S/A - Petrobrás. Procurador: Seldon Parkes. BR nº PI 9911533-6 B1
2	Unidade de bombeio para extração de petróleo dotado de contrapeso dinâmico alimentado por energia solar ou eólica. Depositante: Omar Pereira Gurgel. Procurador: Vilage Marcas

Fonte: Autores (2021)

Além dos números e gráficos apresentados acima, um importante resultado dessa pesquisa foi a compilação do que tem se discutido atualmente sobre o tema.

Figura 6: Diagrama esquemático do sistema de bombeio com molas

1: Engrenagem de fricção; 2: conjunto de molas superiores; 3: quadro do sistema de bombeio; 4: correia; 5: contrapeso; 6: cabine de controle eletrônico; 7: Motor e redutor de conversão de frequência CA; 8: conjunto de molas inferiores; 9: corrente dentada.



Fonte: MENG *et al.*, 2017

Entre as diferentes técnicas para economia de energia, MENG *et al.* (2017) propõe o uso de molas no sistema de bombeio para reaproveitamento energético. Na unidade de bombeio tradicional, tanto para iniciar o sistema quanto para pará-lo, percebe-se impacto no torque de saída do motor, o que traduz em aumento do consumo de energia. Para resolver isto, os autores propõem uma solução para alcançar o uso racional de energia. A ideia seria armazenar a energia dinâmica gerada na movimentação da unidade de bombeio em outro sistema mecânico. E assim, a energia armazenada poderia ser reutilizada para acelerar o motor no sistema de bombeamento. Segundo eles, isso contribuiria para uma partida mais suave do motor, o que reduziria sua flutuação de torque e conseqüentemente, colaboraria com uma redução do tempo de partida. A instalação de molas pode ajudar a reduzir o impacto no sistema e diminuir significativamente o consumo de energia.

Para esta proposta, o diagrama esquemático do sistema é apresentado na Figura 6.

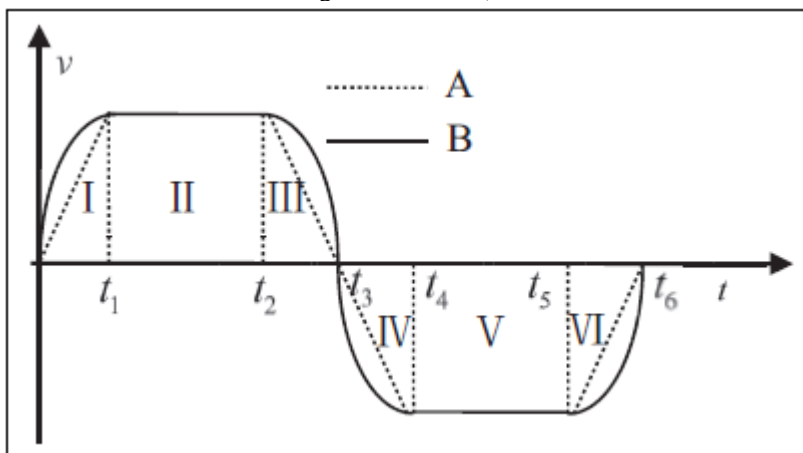
Os conjuntos de molas (2,8) são instalados na parte superior e inferior do conjunto. O motor de conversão de frequência CA e o redutor (7) são instalados na parte inferior da unidade. Tanto na parte superior como na inferior da estrutura existe uma corrente dentada (9). Uma parte desta corrente é fixada no contrapeso (5). Quando o motor fornece energia para a movimentação da corrente, o contrapeso é movido. A

haste de bombeio está conectada ao contrapeso através da correia (4) que envolve a engrenagem de fricção (1) na outra extremidade. Portanto, quando o contrapeso está se movendo para cima ou para baixo, a haste de bombeio segue esse movimento.

Quando a unidade de bombeio está no curso ascendente, o contrapeso está se movendo para baixo. Nesse momento, o contrapeso entra em contato com o conjunto de molas inferiores, movendo-se continuamente para baixo até apertar o fundo do conjunto de molas. Dessa forma, a energia potencial elástica é armazenada no conjunto inferior de molas. Quando o contrapeso inicia o curso ascendente, o conjunto de molas inferiores ajuda a acelerar seu movimento, que fica em movimento linear uniforme até entrar em contato com o conjunto de molas superiores, que posteriormente é espremido pelo contrapeso. Neste momento, a energia potencial elástica é armazenada no conjunto de molas superiores. Da mesma forma, o conjunto de molas superiores ajudará a acelerar o movimento do contrapeso, que estará em movimento linear uniforme até entrar em contato com o conjunto de molas inferiores. Assim, a unidade de bombeio repete esse ciclo descrito continuamente.

A curva de velocidade de uma unidade de bombeio tradicional é trapezoidal, como mostrado na Figura 7.

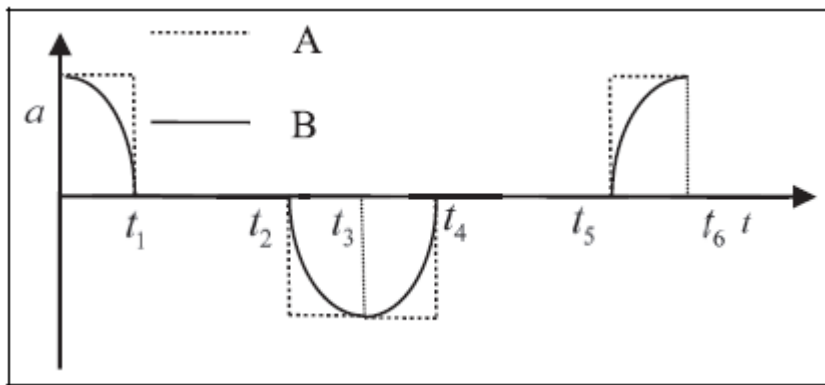
Figura 7: Curva de velocidade (A: curva de velocidade de uma unidade de bombeio tradicional e B: curva de velocidade de uma unidade de bombeio com energia armazenada).



Fonte: MENG *et al.*, 2017

Por meio da Figura 7 é possível notar que a aceleração de uma unidade de bombeio tradicional no período entre a partida e a parada é uma constante de valor a , podendo chegar a zero se o movimento da unidade de bombeio for uniforme linear. Portanto, há momentos em que o valor da aceleração varia de a a 0 ou de 0 a a . A mudança abrupta da aceleração pode reduzir a vida útil da unidade de bombeio.

Figura 8: Curva de aceleração (A: curva de aceleração de uma unidade de bombeio tradicional e B: curva de aceleração de uma unidade de bombeio com energia armazenada).



Fonte: MENG *et al.*, 2017

Na solução proposta, dois conjuntos de molas são instalados no sistema, o que altera a curva de velocidade para um formato senoidal, como mostrado na Figura 7. A curva de aceleração resultante é apresentada na Figura 8. Obviamente, na curva B da Figura 8, não há mudança abrupta na aceleração, o que sugere uma redução no impacto na unidade de bombeio e consequentemente, um aumento de sua vida útil.

Os resultados da pesquisa de MENG *et al.* (2017) mostraram que um sistema de bombeio com novas fontes de dispositivos de armazenamento de energia tem um efeito significativo de economia de energia em comparação com o sistema de bombeio tradicional, podendo chegar a uma economia de 9,204%. Ao atingir o fundo no ponto morto, o sistema de bombeio requer um grande torque inicial do motor para reverter o contrapeso no sistema tradicional de bombeio, enquanto nesta nova proposta com molas, pode-se reduzir o torque inicial do motor, o que poderia aumentar a vida útil do motor. Além disso, a curva de velocidade do motor proposta é senoidal, o que torna a partida e parada do sistema mais suave. Portanto, a estratégia proposta poderia prolongar a vida útil do sistema de bombeio.

SUDITU *et al.*, (2019) propõe uma discussão sobre um outro aspecto importante no que diz respeito às formas eficazes de reciclagem de energia. Para eles, as seguintes etapas devem ser executadas: avaliação de fontes secundárias de energia (SES - *secondary energy sources*) e uso de fontes renováveis de energia (RES - *renewable energy sources*).

Os autores relatam que as fontes secundárias de energia de um processo representam todas as formas de energia não utilizadas no respectivo processo. Elas são resultantes do desenvolvimento tecnológico primário, como seus subprodutos, sendo parte das perdas de energia do processo. A quantidade de energia do SES que não é recuperada se dissipa no meio ambiente. Os motivos para a ocorrência de SES são as imperfeições energéticas dos processos que ocorrem dentro do contorno considerado. Quanto maior a energia do SES, mais os processos no contorno ocorrem com menores rendimentos de energia. Por razões técnicas e econômicas, apenas uma parte do SES resultante pode ser usada.

Segundo eles, as fontes de energia renováveis são a parte das fontes de energia secundárias que pode ser recuperada no contexto da eficiência econômica. Esta parte depende do estágio de desenvolvimento da tecnologia em questão, bem como dos custos de energia e materiais utilizados.

Os efeitos da recuperação de fontes secundárias de energia em equipamentos utilizados no setor petrolífero não são apenas técnicos, mas também econômicos e ambientais. Em termos técnicos, a adequação de sistemas de recuperação energética permite a implementação de tecnologias energeticamente eficientes. Como resultado, esses aspectos tecnológicos podem ser otimizados. Do ponto de vista econômico, a busca por economia de energia é o que induz a redução do consumo de energia para o contorno considerado e uma economia do combustível convencional. O aspecto ecológico da recuperação de fontes de energia secundárias relaciona-se à redução das emissões de calor, que segundo alguns autores, representam um perigo para o equilíbrio ecológico do planeta (SUDITU *et al.*, 2019).

Eles afirmam que a eficiência de recuperação de fontes secundárias de energia em uma planta de produção de petróleo é medida levando-se em consideração critérios tecnológicos, energéticos, ecológicos e econômicos. No que diz respeito aos critérios tecnológicos, as soluções de recuperação permitem otimizar os processos de transporte, armazenamento e tratamento do petróleo. O principal indicador de energia que mostra a eficiência das soluções de recuperação é a economia de combustível convencional. A eficiência ecológica é determinada levando em consideração a redução da poluição térmica. A eficiência econômica é determinada por cálculos específicos que levam em consideração o custo, o benefício e a relação custo-benefício.

Usando uma abordagem diferente, ZHANG *et al.*, (2020) propõe, pela primeira vez, um modelo híbrido de unidade de bombeio motor-eólico, empregando uma pequena turbina eólica na unidade de bombeio. A energia eólica não é convertida em eletricidade, mas em vez disso, usa uma transmissão hidráulica para conduzir diretamente a carga. A nova estrutura de transmissão mecânico-hidráulica pode atingir uma combinação de energia eólica e eletricidade, e melhorar a eficiência motora. Como o equipamento de geração de energia é eliminado, o custo unitário diminui e a energia eólica pode ser utilizada de forma mais eficiente. Este método pode efetivamente resolver os problemas existentes de utilização da energia eólica em campos de petróleo.

Segundo eles, essa ideia surgiu uma vez que, de acordo com boletins meteorológicos, muitos campos de petróleo têm energia eólica abundante, que poderia ser usada em vez da energia elétrica para conduzir unidades de bombeamento de óleo.

Em seu artigo, eles exemplificam que muitos campos de petróleo na China tentaram usar a geração de energia eólica em vez da rede elétrica para realizar economias de energia. Em tais situações, instalava-se uma grande turbina eólica para acionar várias unidades de bombeio. O equipamento de geração de energia eólica ficava disposto próximo a unidade de bombeio e o fornecimento de energia era disponibilizado para a unidade simultaneamente com a rede elétrica.

No entanto, os dados reais durante a operação mostraram que o efeito de economia de energia não é ideal, além de ser uma estrutura complexa e de alto custo. O problema da baixa eficiência do motor não foi

resolvido, o que torna a utilização da energia eólica ineficiente. Portanto, o reaproveitamento energético não foi alcançado.

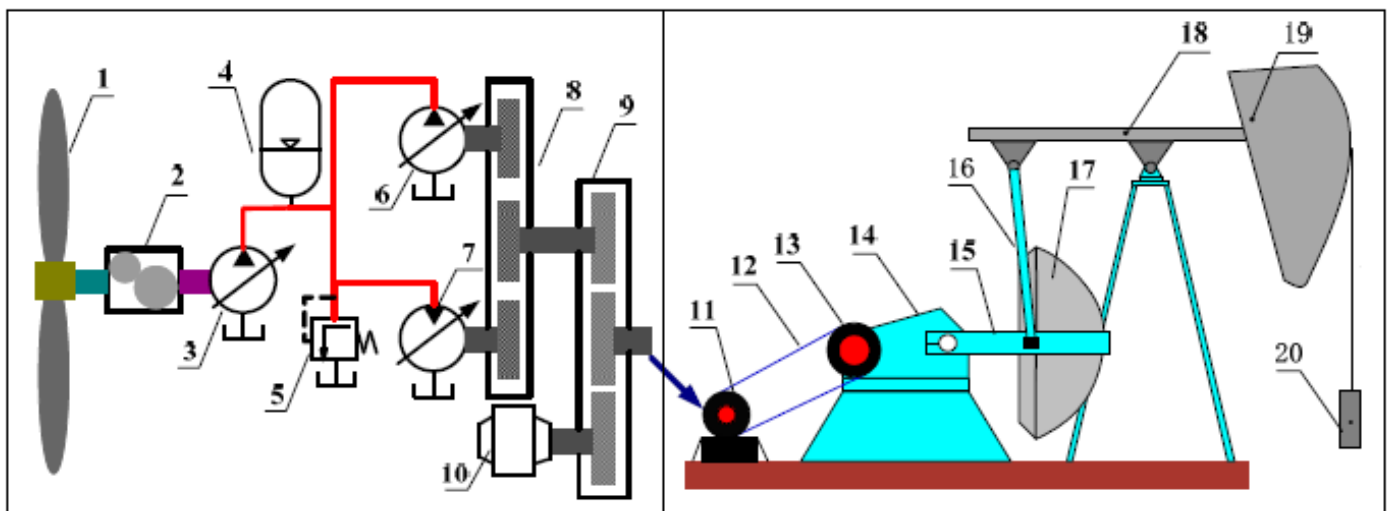
Esta estrutura de transmissão híbrida é de grande importância, pois abre novas possibilidades para o uso de energia eólica em campos de petróleo. Além disso, os campos de petróleo em áreas remotas enfrentam problemas com a falta de eletricidade e costumam ser ricas em recursos eólicos. Grandes turbinas eólicas são caras e o custo de construção de um parque eólico é alto. O sistema híbrido motor-eólico é caracterizado por baixo custo, estrutura simples e forte adaptabilidade, tornando-o especialmente adequado para campos de petróleo em áreas remotas (ZHANG *et al.*, 2020).

Neste artigo, os pesquisadores estabeleceram um modelo matemático para um sistema híbrido eólico-motor. Com o intuito de pesquisar o desempenho do sistema híbrido eólico-motor, uma estação de teste do sistema foi construída. Por experimentação e simulação numérica, a viabilidade do sistema híbrido eólico-motor foi verificado.

O modelo de configuração de uma unidade de bombeio de hastes tradicional é mostrado na parte direita da Figura 9.

Figura 9. Modelo de configuração da unidade de bombeamento de feixe híbrido com motor hidráulico.

1. Turbina eólica; 2. engrenagem de aumento de velocidade; 3. bomba variável; 4. acumulador; 5. alívio; 6. bomba variável; 7. Motor hidráulico; 8. engrenagem de acoplamento de torque; 9. engrenagem de acoplamento de torque; 10. eletromotor; 11. polia pequena; 12. cinto; 13. polia grande; 14. redutor; 15. manivela; 16. ligação; 17. Contrapeso; 18. feixe; 19. cabeça; 20. haste de sucção



Fonte: Zhang et al., (2020)

O motor principal fornece energia para a manivela por meio de uma polia e um redutor. A manivela se move em círculo, o que faz com que a haste de sucção se mova para cima e para baixo. A recuperação mecânica do óleo é realizada pelo movimento alternativo da haste. Geralmente, a unidade de bombeio de hastes é acionada por um motor elétrico de alta potência. No entanto, durante os cursos para cima e para baixo de um período de bombeio de óleo, o valor do torque de carga na manivela muda muito, levando a uma menor eficiência do motor e elevado consumo de energia.

O sistema híbrido de energia eólico-motor é apresentado na parte esquerda da Figura 9. Devido às constantes mudanças na velocidade do vento e mudanças periódicas da carga, é difícil acionar a unidade de bombeio diretamente da turbina eólica; portanto, a energia eólica deve ser convertida em energia hidráulica. Quando a energia eólica é maior do que a carga, o excesso de energia é armazenado, e quando a energia eólica é menor que a energia da carga, o motor elétrico começa o seu trabalho. O sistema híbrido eólico-motor consiste em dois subsistemas. Um é o sistema de bomba de vento, e o outro é o sistema mecânico-hidráulico. O sistema de bomba de vento inclui uma turbina eólica, uma engrenagem de aumento de velocidade e uma bomba variável. A turbina eólica e a bomba estão ligadas por meio de uma caixa de velocidades que aumenta a velocidade. Ao alterar o deslocamento da bomba variável, a velocidade do rotor da turbina eólica pode ser controlada e a turbina eólica pode funcionar na velocidade ideal para manter um alto nível de eficiência. O sistema mecânico-hidráulico inclui uma engrenagem de acoplamento de torque, uma bomba variável e motor hidráulico variável. A bomba e o motor hidráulico são fixados por uma engrenagem de acoplamento de torque. A produção de energia eólica pode ser controlada alterando o deslocamento da bomba e o motor hidráulico e o excesso de energia eólica podem ser armazenados no acumulador. A energia hidráulico-elétrica é combinada por uma engrenagem de acoplamento de torque. Devido ao comum desequilíbrio na estrutura mecânica da unidade de bombeio o eixo da manivela produz torque negativo, o que faz com que o motor atinja um estado de geração de eletricidade. Este problema pode ser resolvido pelo sistema mecânico-hidráulico, que pode realizar a recuperação da energia potencial gravitacional e evitar o problema do motor estar em estado de geração.

Como pode ser percebido, há um interesse crescente na implantação de energia renovável especialmente para instalações remotas de petróleo e gás. A implicação de abordagens inovadoras baseadas em energia renovável também precisa ser avaliada para viabilidade. Osaretin *et al*, (2020) afirmam que existe uma lacuna na literatura que considere a viabilidade técnica e econômica de implantação de energia 100% renovável para produzir petróleo em instalações remotas.

Por esta razão, eles propuseram o uso de energia elétrica de um gerador de energia renovável para alimentar um motor elétrico CA, que serviria como motor principal para um sistema de bombeio mecânico de hastes. A micro rede renovável avaliada para simulação exibe geração híbrida, com duas fontes de energia primária: solar e eólica, e uma fonte backup (armazenamento da bateria), além do motor principal ou motor elétrico CA.

Uma vez que o armazenamento de energia é adotado e as fontes são 100% renováveis, o gerador de produção operaria em ou perto de sua capacidade máxima nominal, sem produzir qualquer excesso de eletricidade. O projeto proposto deve explorar economicamente a energia solar, a energia eólica ou ambas, com armazenamento de bateria para sustentar a produção de hidrocarbonetos.

Esta pesquisa ainda está em fase de simulação e se produzir os resultados propostos, será uma boa alternativa para geração de energia nessas áreas.

LV *et al.*, (2016) ressaltam que manter o equilíbrio da unidade de bombeio também é importante para a economia de energia. Uma vez que uma unidade de bombeio esteja bem equilibrada, isso não é apenas benéfico para a segurança do equipamento, mas também pela possibilidade de converter o excesso de energia do motor em energia potencial gravitacional para o contrapeso durante o curso descendente.

No artigo, os autores propõem um sistema online visando o ajuste automático da velocidade do curso de acordo com as condições dos poços de petróleo. O grau de equilíbrio conseguiria ser estimado em tempo real, além dos estados operacionais serem monitorados online por meio de um navegador em um computador ou smartphone para dar uma resposta oportuna a uma situação anormal quando necessário.

Este sistema foi instalado e aplicado em uma série de campos petrolíferos localizados no noroeste da China, como o campo petrolífero Huachi na província de Gansu, o campo petrolífero Tuha na província de Xinjiang, e o Campo petrolífero de Wuqi na província de Shaanxi.

Os autores concluíram que esperam que o sistema possa cumprir as necessidades reais, de modo que o orçamento de energia de cada unidade de bombeio possa ser alocado razoavelmente para otimizar o consumo global de energia em campos petrolíferos.

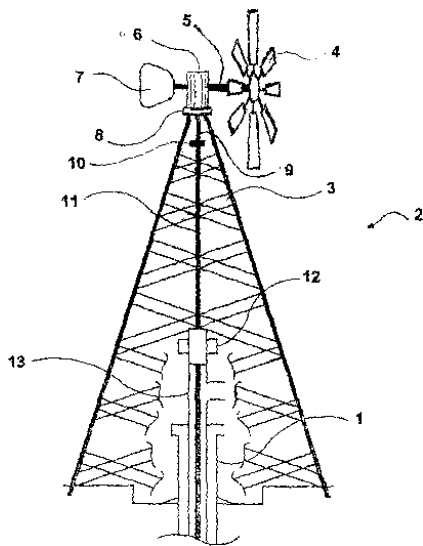
Há estudos, como o de PINHEIRO *et al.*, (2012), que visam substituir o método de alimentação convencional das unidades de bombeio mecânico por fontes alternativas de energia, como a energia eólica. Embora haja relatos de que algumas unidades da Petrobras do Rio Grande do Norte e Ceará já utilizem esses sistemas, estes apresentam problemas como alto custo de aquisição, elevadas perdas e baixa confiabilidade.

Nessa linha, existem alguns trabalhos publicados que propõe um sistema híbrido com fonte eólica e solar, por exemplo, para ser utilizado até mesmo em locais sem rede elétrica, embora estas propostas sejam para outras aplicações, como o trabalho de GRANT *et al.* (2017), que visa o uso de fontes múltiplas para garantir que bombas d'água terão potência suficiente para funcionar. Estas fontes de energia não requerem entradas externas (além do sol e do vento). Por esta razão, as bombas poderiam ser colocadas em áreas remotas, o que seria muito útil para comunidades em desenvolvimento, onde os residentes podem não ter um fornecimento de energia confiável.

O desenvolvimento de formas de aproveitamento de energia, dentre elas, a eólica, como fonte de energia, é uma tentativa de baratear os custos de produção. Para exemplificar, pode-se citar a patente PI 9911533-6 B1 da Petrobras que versa sobre uma unidade de bombeio eólica (COSTA, 2006). Trata-se de um equipamento que capta correntes de vento (energia eólica) e as transforma em energia mecânica com o objetivo de acionar uma bomba rotativa presente num poço produtor e assim, extrair fluidos dos poços.

A Figura 10 mostra a representação desta invenção.

Figura 10: Esquema de unidade de bombeio eólica

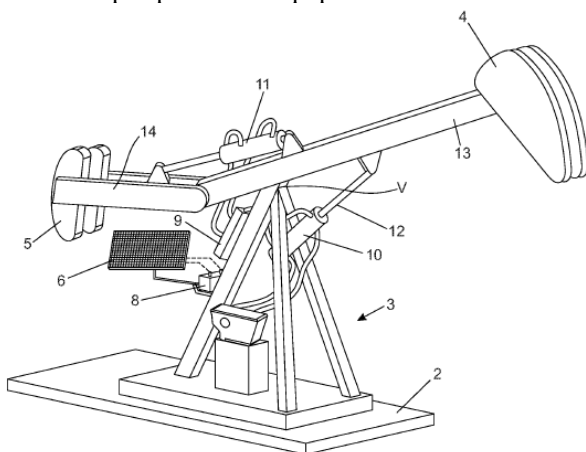


Fonte: COSTA (2006)

Observa-se instalado na parte superior um cata-vento (4), que captaria correntes de vento realizando um movimento de rotação; um eixo horizontal (5), para transmitir o movimento rotativo e para suporte do cata-vento; uma caixa de transmissão (6), para a mudança de eixo de movimento rotativo no plano horizontal para o movimento rotativo no plano vertical; um leme direcionador (7), para deslocar o cata-vento; uma mesa de direção (8), com meios que permitiriam um deslizamento rotacional; um eixo vertical (9), para a transmissão do movimento rotativo no plano vertical; um elemento de união (10); para unir a caixa de transmissão a outras partes do sistema; uma haste de transmissão (11) para transmitir os movimentos rotativos no plano vertical recebidos; uma caixa de vedação (12), para vedar vazamentos de fluido produzido e a parte superior da tubulação de produção (13).

A figura 11 mostra um outro exemplo de patente, de número PI 102013014012 A2, que versa sobre uma unidade de bombeio para extração de petróleo dotado de contrapeso dinâmico alimentado por energia solar ou eólica (GURGEL, 2014).

Figura 11: Vista em perspectiva do equipamento

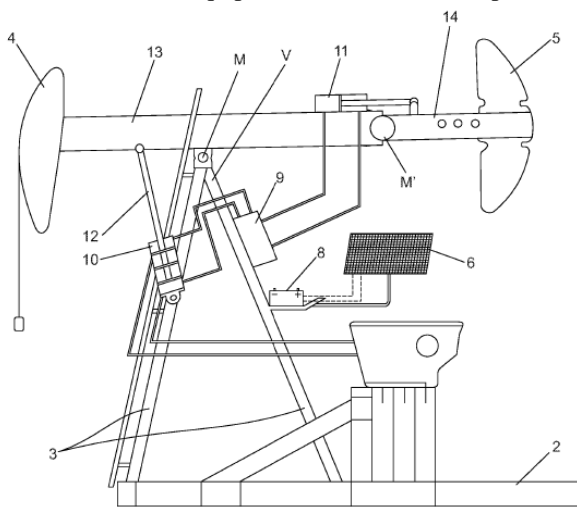


Fonte: GURGEL (2014)

Trata-se de um equipamento composto por uma base (2), que sustenta uma estrutura piramidal (3), com vértice superior (V). Um mecanismo mancalizado movimenta o pêndulo UB (4), auxiliado por um pêndulo manivela (5), que se movimenta e pivota através de um mancal auxiliar.

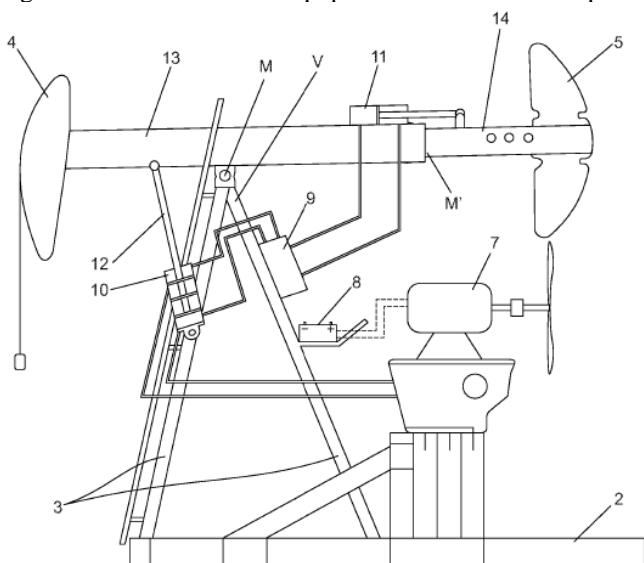
Ainda na estrutura piramidal é inserida uma placa solar (6), conforme mostra a Figura 12, ou eólica (7), conforme se observa na Figura 13, que mantém recarregada a bateria (8), cuja função é alimentar uma caixa de comando hidráulico (9), que por meio de ajuste manual ou por meio de software, faz o sincronismo de uma bomba alternativa (10) em relação a um cilindro hidráulico (11), responsáveis pelo acionamento e movimento dos pêndulos.

Figura 12: Vista lateral do equipamento funcionando a partir de energia solar



Fonte: GURGEL (2014)

Figura 13: Vista lateral do equipamento funcionando a partir de energia eólica



Fonte: GURGEL (2014)

O funcionamento do equipamento tem o princípio básico de movimentar, por meio gravitacional, o pêndulo UB (4). Todo este mecanismo em funcionamento é alimentado por uma bateria (8) que por meio de

uma energia solar (6) ou eólica (7) geram eletricidade, ficando o equipamento em funcionamento permanente, sem interrupções, e proporcionando o consumo de energia em custo baixo.

Durante a pesquisa, percebeu-se que havia, além da questão do reaproveitamento energético, trabalhos que se empenhavam em abrir novos caminhos para otimizar a estrutura do sistema de bombeio mecânico por hastes, desde modelagem matemática a alterações mecânicas no próprio sistema visando a melhoria da eficiência da máquina. Essas alterações podem contribuir para a redução da potência do motor elétrico ou abrir possibilidade de se trabalhar com geradores lineares, aerogeradores e até mesmo sistema fotovoltaico, todos de menor potência, garantindo que o fornecimento de energia elétrica para o sistema seja menor, tornando-o menos dependente da eletricidade.

Alguns artigos apresentaram modelos matemáticos para simular vibrações e propor ajustes que tentassem minimizar as perdas de energia, contribuindo com motores menos potentes, e portanto, com um menor consumo de energia. Segundo Ali *et al.*, (2015) a maioria dos artigos que tratam da modelagem de problemas do mundo real, utilizam-se de técnicas de otimização incluindo heurística, métodos finitos, algoritmos inteligentes, dentre outros. Artykaeva *et al.*, (2011) mencionam, por exemplo, que o cálculo preciso de algumas variáveis importantes que podem ajudar a relacionar o torque acionado do motor com as cargas dinâmicas as quais a haste polida se submete não pode ser resolvido de forma eficaz pelo método de modelagem tradicional.

Hansen *et al.*, (2018) ilustraram a capacidade de usar um modelo matemático chamado de modelo controlador preditivo aplicando-o em sistemas de produção de petróleo com bombas de haste de sucção. Este modelo inclui tanto a dinâmica do reservatório e do poço como a unidade de bombeio visando otimizar o controle de parâmetros e ao mesmo tempo considerar todas as principais restrições físicas do sistema simultaneamente. Foi constatado que a aplicação do modelo resultou em um ligeiro aumento na produção de petróleo. Para pesquisas futuras, os autores sugeriram verificar os ganhos de produção por mais tempo e com simulações de reservatório de alta fidelidade.

Li *et al.*, (2016) comentam em seu trabalho que no curso ascendente, o motor precisa de maior torque de acionamento, pois o sistema tem que puxar a haste de sucção e a bomba, tornando a carga na haste polida maior. Já no curso descendente o motor necessita de menor torque, pois a haste de sucção e a bomba podem ser empurradas por sua própria gravidade, de modo que a carga na haste polida é menor. Na produção real em campos de petróleo, esta carga complexa e as condições mutáveis implica numa eficiência operacional inferior ao mesmo tempo que o consumo de energia do motor é superior. Um modelo preciso do sistema é uma premissa muito importante para que o gerenciamento da operação economize energia, reduza os custos e melhore a eficiência. Se as relações entre o motor, torque e as flutuações de carga puderem ser conhecidas com precisão, medidas razoáveis para ajustar os parâmetros de produção poderão ser tomadas. Como a haste de sucção, a bomba de subsuperfície e outros dispositivos funcionam em centenas ou milhares de metros abaixo do solo, é difícil dominar, com precisão, suas leis de operação e ter um cálculo preciso delas pelo

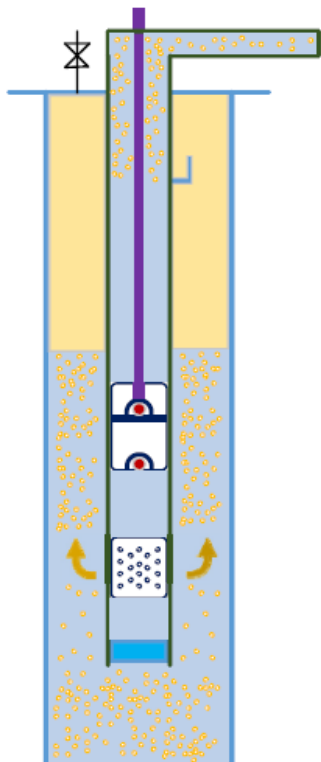
modelo de mecanismo tradicional devido às condições de trabalho complexas e alguns fatores ambientais incertos. Então, em grande parte da pesquisa teórica e para muitas aplicações reais, eles são comumente fornecidos por experiências de operação, o que pode levar a erros maiores.

Depois de levar isso em consideração, esses colaboradores passaram a usar o método de modelagem focando nas mudanças dinâmicas do torque do motor em relação às mudanças dinâmicas de carga na haste polida. A fim de resolver o problema de cálculo para as variáveis intermediárias que são incapazes de serem medidas diretamente no modelo, foi usado um método de modelagem híbrido. O método, então, foi aplicado a quatro poços de petróleo. Os autores concluíram que os atritos subterrâneos não podem ser ignorados, pois têm um grande impacto nas cargas da haste polida. Além disso, concluíram também que o método de modelagem híbrida foi eficaz.

Uma outra abordagem encontrada foi em relação a composição de materiais utilizados no sistema de bombeio de hastes. Cen *et al.*, (2015) mencionam que reservatórios profundos com mais de 5000 m de profundidade estão continuamente sendo descobertos e desenvolvidos no Oeste da China, especialmente na Bacia do Tarim. A baixa pressão nesses reservatórios torna necessária a operação de bombas de haste de sucção em grandes profundidades, o que aumenta a carga na haste polida e cria problemas de bombeio nos poços profundos. Os autores examinaram duas técnicas para reduzir a carga da haste polida. A primeira técnica utilizou barras compostas de aço e fibra de vidro e a segunda técnica utilizou redutores de carga nas barras. Os efeitos dessas técnicas foram avaliados e comparados. A eficiência energética foi analisada calculando o torque baseado na diferença entre as cargas máximas e mínimas na haste polida. Os resultados do estudo mostraram que as hastes compostas de aço e fibra de vidro reduzem a carga máxima em 35,7% e que a inclusão de redutores de carga diminui a carga em uma média de 22,8%, o que é um resultado significativo. Logo, a haste composta de aço e fibra de vidro é mais eficiente em termos de energia do que o redutor de carga.

Em campos de petróleo com alta razão gás óleo, a liberação de gás dentro da bomba pode notavelmente deteriorar o desempenho de trabalho da haste acoplada a ela. Uma solução comum e eficaz é instalar um separador de gás no fundo do poço antes do fluido entrar na câmara, que pode desviar o gás livre para o anular. Han *et al.*, (2016) propõe a reinjeção do gás de volta à tubulação em uma profundidade mais rasa, acima da bomba. O gás que flui é então recombinado com o líquido e diminui a densidade do fluido. Assim, o poço produtor pode ter uma taxa de produção aprimorada em favor da assistência de bombeio e elevação do gás, conforme mostrado na figura 14. A eficiência média de levantamento do sistema e a taxa de produção aumentou em 20% e 15% respectivamente.

Figura 14: Alteração de projeto para reinjeção de gás



Fonte: Han *et al.*, (2016)

Jiang *et al.*, (2016) versaram sobre um modelo de eficiência do sistema de bombeio de hastes considerando a influência de centralizadores na carga da haste polida. Os centralizadores podem aumentar a carga da haste polida e afetar a eficiência do sistema de bombeio. A influência dos centralizadores, o comprimento do curso e a velocidade de bombeio da haste de sucção foram estudados. Os resultados indicaram que a eficiência do sistema de bombeio e a taxa de produção diminuíam quando o número de centralizadores aumentava, porém, a influência do número de centralizadores na eficiência do sistema e na taxa de produção não era grande se comparada à influência do comprimento do curso e velocidade de bombeio, que são significativos.

Os autores Yu *et al.*, (2016) mencionam que na China os campos de petróleo offshore usam bombas submersíveis como o principal equipamento de elevação. No entanto, muitos problemas técnicos têm surgido como resultado do uso dessas bombas. Portanto, tornou-se uma necessidade urgente estudar novas formas de elevação artificial para atender à necessidade de desenvolvimento eficiente de poços, principalmente os de campo que possuem petróleo bruto pesado. Embora a unidade de bombeio de hastes convencional seja uma tecnologia madura e bem conhecida, apresenta, para o ambiente offshore, uma grande desvantagem em peso, tamanho e espaço necessário para instalação, geralmente ultrapassando o limite da plataforma de petróleo offshore. Por essa razão, os autores pensaram em utilizar uma unidade de bombeio hidráulico nesse ambiente, pois este sistema possui construção compacta e leve e se adapta a uma ampla gama de condições

operacionais. Atualmente, a unidade de bombeio hidráulico pode ser dividida em dois tipos: unidades com um único contrapeso e unidades sem contrapeso, mas com diferentes formas de equilíbrio.

Uma nova unidade de bombeio hidráulico tem sido estudada por esses autores, conforme mostrada na figura 15. O sistema consiste principalmente em uma base de bombeio, uma combinação de sistemas hidráulicos cilíndricos, um grupo de polia, um grupo de tanques de armazenamento de energia, um sistema de controle hidráulico e sistemas de energia.

Figura 15: Protótipo de laboratório de um bombeio hidráulico para testes onshore



Fonte: Yu *et al.*, (2016)

Durante o movimento ascendente, o cilindro se estende, levantando a haste polida. Quando a haste cai durante o curso descendente e pressiona o óleo hidráulico na câmara de fluido do cilindro há armazenamento de energia potencial gravitacional que poderá ser utilizada no sistema. Um protótipo de laboratório foi feito com base em modelos matemáticos e nos resultados do cálculo do projeto, com as seguintes medidas: 1,0 m de comprimento, 0,7 m de largura e 4,0 m de altura. O protótipo funciona sem problemas e atende aos requisitos de laboratório, que verifica a eficácia do esquema geral de design e configurações para o teste de campo.

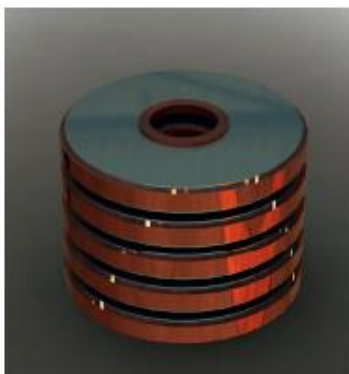
Zhang *et al.*, (2018) propuseram uma nova abordagem para diagnosticar automaticamente falhas no sistema de bombeio. Na prática de produção, esses sistemas não são estáveis e muitos tipos de falhas podem causar a redução da produção de petróleo, parada de produção e até mesmo danos ao equipamento. Portanto, diagnosticar as falhas do sistema de forma automática tem sido um importante assunto de pesquisa. Para

sistemas de bombeio de hastes, diferentes condições de trabalho podem ser representadas pelas formas dos cartões dinamométricos. Por meio de uma metodologia específica várias características são extraídas de cartões dinamométricos amostrados de sistemas de bombeio de hastes e então um algoritmo é proposto e aplicado como um classificador. Um dos produtos desta metodologia é a construção gráfica para explorar a estrutura inerente dos cartões dinamométricos. Os resultados demonstraram a eficácia da abordagem proposta para o diagnóstico de falhas em sistemas de bombeio de hastes. A redução de falhas no sistema contribui para melhorar a eficiência do sistema, que por sua vez, permite a operação acontecer de forma mais rápida, contribuindo com um menor consumo global de energia elétrica.

É sabido que no equipamento de bombeio mecânico de hastes há uma ampla gama de oscilações e cargas inerciais que afetam adversamente a fadiga das hastes de sucção causando possíveis acidentes. Uma falha na coluna de hastes leva a longos e caros reparos nos poços. Cargas dinâmicas e vibrações irregulares são sérios problemas de operação da coluna da haste de bombeio, que está sujeita a vibrações de fricção, especialmente ao operar um poço de perfil complexo. Além disso, as cargas são transmitidas aos elementos da bomba da haste de sucção, resultando em desgaste durante a produção de petróleo. Velychkovych *et al.*, (2020) estudaram o efeito do desgaste na magnitude e na natureza das cargas no ponto de suspensão da coluna da haste. Segundo eles, um número grande de autores recomenda o uso de revestimentos de proteção especiais a fim de reduzir o desgaste da superfície de contato. Dados experimentais e de campo mostraram que os amortecedores em plantas de bomba de haste de sucção reduzem a intensidade da aplicação de cargas na coluna da haste.

Os autores se propuseram a usar pacotes de placas anulares como elementos elásticos para absorção de choque nas hastes do equipamento (figura 16). O trabalho apresentou os principais conceitos de modelagem mecânica e matemática desses amortecedores.

Figura 16: Visão geral do pacote de placas anulares



Fonte: Velychkovych *et al.*, (2020)

Por fim, os autores propuseram um novo desenho de placa de amortecimento, cuja peculiaridade é o pacote de placa fina usada como o principal elemento de rolamento do dispositivo. O trabalho estudou o

desempenho das características mais importantes do amortecedor e avaliou sua força e rigidez. Em geral, os resultados da análise teórica apresentados no artigo tornam possível projetar a suspensão elástica da coluna de haste para contribuir com operações mais eficazes. As próximas etapas do estudo visam o teste do protótipo da placa do amortecedor.

Shedid (2021) utilizou os dados reais de um poço no campo de McElroy (sul de Midland, Texas, EUA) para determinar quais seriam as condições operacionais ideais para o curso e velocidade de bombeio para otimizar o mecanismo no sistema de bombeio mecânico de haste. Os resultados obtidos indicaram que o uso de velocidades de bombeio mais altas causa estresses de longo prazo e perdas de eficiência de fricção no sistema de bombeio, aumentando a depreciação de capital e causando perdas financeiras de longo prazo no sistema operacional. Os resultados também provaram que a aplicação de unidades de bombeio de curso longo com velocidades de bombeio mais baixas resulta em custos operacionais de curto prazo semelhantes a uma unidade convencional com um comprimento de curso menor e alta velocidade de bombeio. Os autores concluíram que a longo prazo a aplicação de curso longo com baixa velocidade oferece a melhor durabilidade devido à sua vantagem financeira e mecânica para a unidade de bombeio.

4 Considerações finais

Em relação aos objetivos propostos neste artigo, pôde-se constatar que após ser feito o levantamento bibliográfico do tema de estudo, o número de artigos publicados encontrados foi bem reduzido, o que sugere que o assunto ainda precisa ser mais explorado.

Os resultados obtidos pela ferramenta Biblimetrix® indicaram que as palavras chaves mais frequentes não foram compatíveis com o que fora definido na busca inicial, confirmando a produção científica escassa relacionada ao tema aqui proposto.

Mesmo assim, foi possível identificar algumas tendências de estudos sobre reaproveitamento energético em equipamentos mecânicos de bombeio com hastes, como a inserção de molas no sistema para armazenar energia potencial elástica visando acelerar o contrapeso, tanto no curso ascendente como no curso descendente.

Também foi possível acompanhar a discussão sobre as formas eficazes de reciclagem de energia, cujo desenvolvimento sugere a avaliação de fontes secundárias de energia e o uso de fontes renováveis de energia como etapas que devem ser executadas.

Além disso, foi possível compreender que os estudos nessa área possuem projeção de aumentar e que alguns novos sistemas já estão sendo testados, como o modelo híbrido de unidade de bombeio motor-eólico, empregando uma pequena turbina eólica na unidade de bombeio.

Referências

- ALI, M. M., ADEWUMI, A.O., BLAMAH, N., FALOWO, O. **Mathematical Modeling and Optimization of Industrial Problems**. Journal of Applied Mathematics, Vol. 2015, p. 1–3, 2015.
- ARAÚJO, C. A. A. **Bibliometria: evolução histórica e questões atuais**. Em *Questão*, v. 12, n. 1, p. 11–32, 10 dez. 2006.
- ARTYKAEVA, E.M., GENIN, V.S., NESTERIN, V.A. **Prospects for advancement in the energy efficiency of oil-producing sucker rod pumps**, 82(10), 513–517, 2011.
- BRETAS, W.V. **Inteligência Empresarial a partir da Mineração de dados em bases internacionais de patentes**. 2018. Dissertação de Mestrado – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Fluminense, Programa de Pós-graduação em Sistemas Aplicados à Engenharia e Gestão, Campos dos Goytacazes, Rio de Janeiro, 2018.
- CEN, X., WU, X., GAO, S. **Two Techniques for Reducing Sucker-Rod Loads in Deep Wells**. Chemistry and Technology of Fuels and Oils, 51(4), 371–378, 2015.
- COSTA, R.O. **Unidade de bombeio eólica**. Depositante: Petróleo Brasileiro S/A - Petrobrás. Procurador: Seldon Parkes. BR nº PI 9911533-6 B1. Depósito: 24 de fevereiro de 1999. Concessão: 06 de junho de 2006.
- GALVÃO, H.L.C., OLIVA, G.B.F.F., SILVA, R.E., COSTA, R.O., MAITELLI, A.L., MAITELLI, C.W.S.P. **Development and Application of a Control Strategy for Sucker Rod Pump Artificial Oil Lift System**. IEEE Latin America Transactions, 16(8), p. 2177–2183, 2018.
- GRANT, D.W, YEH, W.C Hybrid Water Pump. Senior Project - Electrical Engineering Department, California Polytechnic State University, San Luis Obispo, 2017.
- GURGEL, O.P. **Unidade de bombeio para extração de petróleo dotado de contrapeso dinâmico alimentado por energia solar ou eólica**. Depositante: Omar Pereira Gurgel. Procurador: Vilage Marcas e Patentes LTDA. BR nº 102013014012 – A2. Depósito: 06 de junho de 2013. Concessão: 23 de setembro de 2014.
- HAN, G., ZHANG, H., LING, K. (2016). **The optimization approach of casing gas assisted rod pumping system**. Journal of Natural Gas Science and Engineering, Vol. 32(), p. 205–210, 2016.
- HANSEN, B., TOLBERT, B., VERNON, C., HEDENGREN, J. D. **Model Predictive Automatic Control of Sucker Rod Pump System with Simulation Case Study**. Computers & Chemical Engineering, Vol. 121, p. 265-284, 2018.
- JIANG, Z., ZHANG, D., ZI, B., CUI, G., DING, H. **The Sucker Rod Pump Parameters Optimization of Horizontal Wells with ASP Flooding Considering the Influence of Centralizers**. MATEC Web of Conferences, Vol. 77, 01026, 2016.
- LI, K., HAN, Y. **Modelling for motor load torque with dynamic load changes of beam pumping units based on a serial hybrid model**. Transactions of the Institute of Measurement and Control, 40(3):903-917, 2016.

LV, H., LIU, J., HAN, J., JIANG, A. **An Energy Saving System for a Beam Pumping Unit.** Sensors, 16(5), 685, 2016.

MENG, H.J., QUAN, L., WANG, Z., WANG, C.W., Lan, Y. **An energy-saving pumping system with novel springs energy storage devices: Design, modeling, and experiment.** Advances in Mechanical Engineering, 9(1), p. 1-11, 2017.

MIHELICIC, J. R., NAUGHTON, C. C., VERBYLA, M. E., ZHANG, Q., SCHWEITZERA, R. W., OAKLEY, S. M., WHITEFORD, L. M. **The Grandest Challenge of All: The Role of Environmental Engineering to Achieve Sustainability in the World's Developing Regions.** Environmental Engineering Science, 34(1), p. 16-41, 2017.

OSARETIN, C.A., IQBAL, T., BUTT, S. **Optimal sizing and techno-economic analysis of a renewable power system for a remote oil well.** AIMS Electronics and Electrical Engineering, 4(2), 132-153, 2020.

PERIÓDICOS CAPES/MEC, 2020. URL: https://www.periodicos.capes.gov.br/index.php?option=com_pcontent&view=pcontent&alias=missao-objetivos&Itemid=109 (Acesso em 01 de outubro de 2020).

PINHEIRO, H.H.C., NORONHA, T.B.P., SEGUNDO, H.A.M., NETO, R.J.O., ROCHA, A.V.C., FARIAS, K.S.O. **Desenvolvimento de Regiões Produtoras de Petróleo Através da Utilização de Energia Eólica na Elevação Artificial de Petróleo.** VII CONNEPI Congresso Norte Nordeste de Pesquisas de Inovação – Palmas, Tocantins (2012).

SHEDID, S. A. **Technical and economical optimization of the performance of sucker rod pumping system."** International Journal of Petroleum Science and Technology, p. 97, 2012.

SUDITU, S., STOICA, M. E., CRISTESCU, T. **Factors Influencing the Enhancement of Energy Efficiency in the Oil and Gas Industry.** MATEC Web of Conferences, 290, 10007, 2019.

VELYCHKOVVCH, A., PETRYK, I., ROPYAK, L. (2020). **Analytical Study of Operational Properties of a Plate Shock Absorber of a Sucker-Rod String.** Shock and Vibration, 1-7, 2020.

YU, Y., CHANG, Z., QI, Y., XUE, X., ZHAO, J. **Study of a new hydraulic pumping unit based on the offshore platform.** Energy Science & Engineering, 4(5), 352-360, 2016.

ZHANG, A., GAO, X. **Fault diagnosis of sucker rod pumping systems based on Curvelet Transform and sparse multi-graph regularized extreme learning machine.** International Journal of Computational Intelligence Systems, Volume 11, Issue 1, pages 428-437, 2018.

ZHANG, C., WANG, L., LI, H. **Experiments and Simulation on a Late-Model Wind-Motor Hybrid Pumping Unit.** Energies, 13(4), 994, 2020.