

PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E INOVAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL
MESTRADO EM ENGENHARIA AMBIENTAL
MODALIDADE PROFISSIONAL

UM ESTUDO SOBRE A GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DE UM GERADOR
LINEAR ACOPLADO A EQUIPAMENTO DE BOMBEIO MECÂNICO DE HASTES EM POÇOS
DE PETRÓLEO

LEANDRO FERREIRA DE SOUZA

MACAÉ-RJ

2021

LEANDRO FERREIRA DE SOUZA

UM ESTUDO SOBRE A GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DE UM GERADOR
LINEAR ACOPLADO A EQUIPAMENTO DE BOMBEIO MECÂNICO DE HASTES EM POÇOS
DE PETRÓLEO

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Fluminense, área de concentração Sustentabilidade Regional, linha de pesquisa Desenvolvimento, Sustentabilidade e Inovação.

Orientador: Dr. Marcos Antonio Cruz Moreira

MACAÉ-RJ

2021

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

S729e Souza, Leandro Ferreira de, 1985-.
Um estudo sobre a geração de energia elétrica a partir de um gerador linear acoplado a equipamento de bombeio mecânico de hastes em poços de petróleo / Leandro Ferreira de Souza. — Macaé, RJ, 2021.
xiii, 57 f.: il. color.

Orientador: Marcos Antônio Cruz Moreira, 1964-.
Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) — Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Fluminense, Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental, Macaé, RJ, 2021.
Inclui referências.
Área de concentração: Sustentabilidade Regional.
Linha de Pesquisa: Desenvolvimento, Sustentabilidade e Inovação.

1. Energia elétrica - Produção - Brasil. 2. Energia - Fontes alternativas. 3. Engenharia do petróleo - Brasil. 4. Bombeio Mecânico - Barras (Engenharia). 5. Poços de petróleo - elevação artificial por hastes. I. Moreira, Marcos Antônio Cruz, 1964-, orient. II. Título.

CDD 621.310981

(23. ed.)

Dissertação de Mestrado intitulada **UM ESTUDO SOBRE A GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DE UM GERADOR LINEAR ACOPLADO A EQUIPAMENTO DE BOMBEIO MECÂNICO DE HASTES EM POÇOS DE PETRÓLEO**, elaborado por **Leandro Ferreira de Souza** e apresentado, publicamente perante a Banca Examinadora, como requisito PARCIAL para obtenção do título de Mestre em Engenharia Ambiental pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental do Instituto Federal Fluminense - IFFluminense, na área concentração Sustentabilidade Regional, linha de pesquisa Desenvolvimento, Sustentabilidade e Inovação.

Aprovado em: 19/11/2021

Banca Examinadora:



Marcos Antonio Cruz Moreira, Doutor em Engenharia Elétrica / Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto Federal Fluminense (IFFluminense) – Orientador



Alline Sardinha Cordeiro Moraes, Doutora em Engenharia e Ciência dos Materiais / Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Instituto Federal Fluminense (IFFluminense)



Robson da Cunha Santos, Doutor em Engenharia Civil / Universidade Federal do Estado do Rio de Janeiro, Instituto Federal Fluminense (IFFluminense)



Severino Joaquim Correia Neto, Doutor em Ciências da Educação/ Universidad Americana, Paraguai, Instituto Federal Fluminense (IFFluminense)



Eduardo Beline da Silva Martins, Mestre em Engenharia Ambiental / Instituto Federal Fluminense (IFFluminense), Instituto Federal Fluminense (IFFluminense)

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho primeiramente a Deus, fonte de todo conhecimento e sabedoria. Também o dedico à minha família: meu grande tesouro.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus a conclusão dessa dissertação, uma vez que emana dele todo o conhecimento e sabedoria.

Agradeço à minha esposa Thais Martins de Souza e aos meus filhos Lucas e Helena, por toda a compreensão e apoio durante os momentos em que era necessária minha ausência para a pesquisa.

Agradeço ao Instituto Federal Fluminense (IFF) pela oportunidade de ingressar no Mestrado em Engenharia Ambiental, aos professores do Programa de pós-graduação em Engenharia Ambiental (PPEA) do IFF, em especial ao professor Dr. Marcos Antonio Cruz Moreira pela orientação nesta pesquisa.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Principais partes do sistema de bombeio mecânico de hastes.....	07
Figura 2 – Métodos de elevação em poços onshore em produção no Brasil em 2019.....	08
Figura 3 – Exemplo de terminadores	11
Figura 4 – Exemplo de atenuadores.....	12
Figura 5 – Exemplo de point absorber.....	12
Figura 6 – Esquema de um WEC Point Absorber.....	13
Figura 7 – Sistema de bombeio mecânico.....	14
Figura 8 – Perda de energia no sistema.....	20
Figura 9 – Poços de petróleo em produção no Brasil em 2019.....	24
Figura 10 – Distribuição estadual de poços onshore que utilizam o bombeio mecânico.....	24
Figura 1 – Esquema mecânico de uma unidade de bombeio convencional	31
Figura 2 – Diagrama Venn dos artigos encontrados	33
Figura 3 – Word cloud das palavras chaves encontradas	35
Figura 4 – Distribuição da produção científica por países relacionada às palavras chave	35
Figura 5 – Evolução quantitativa dos principais termos chave	36
Figura 6 – Diagrama esquemático do sistema de bombeio com molas	37
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).....	38
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).....	39
Figura 9 – Figura 9. Modelo de configuração da unidade de bombeamento de feixe híbrido com motor hidráulico.....	42
Figura 10 – Esquema de unidade de bombeio eólica	44
Figura 11 – Vista em perspectiva do equipamento	45
Figura 12 – Vista lateral do equipamento funcionando a partir de energia solar.....	46
Figura 13 – Vista lateral do equipamento funcionando a partir de energia eólica	46
Figura 14 – Alteração de projeto para reinjeção de gás	49
Figura 15 – Protótipo de laboratório de um bombeio hidráulico para testes onshore	50
Figura 16 – Visão geral do pacote de placas anulares	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Produção de petróleo (mil barris) em 2018.....	09
Tabela 2 – Consumo de Energia com Bombeio Mecânico com Hastes.....	17
Tabela 1 – Termos usados na busca	32
Tabela 2 – Artigos mais relevantes para este estudo	34
Tabela 3 – Mais artigos relevantes para este estudo	34
Tabela 4 – Patentes relevantes para este estudo	37

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

e-SIC – Sistema Eletrônico do Serviço de Informações ao Cidadão

BCS – Bombeio Centrífugo Submerso

BPC – Bombeio por Cavidades Progressivas

GLI – Gás Lift Intermitente

S – Surgência

ANP – Agência Nacional do Petróleo

WEC – Wave Energy Converter

EIA – Energy Information Administration (Administração de Informação Energética)

UB – Unidade de Bombeio

HP – Horse-power

kWh – Quilowatt-hora

WEG – Empresa Multinacional Brasileira

$\eta_{sistema}$: eficiência energética geral

$P_{hidráulica}$: energia hidráulica usada para a elevação de fluidos

$P_{entrada}$: energia elétrica fornecida ao sistema

q_l : energia hidráulica usada para a elevação de fluidos

G : gravidade específica do líquido produzido

L : profundidade da bomba, em ft

$P_{sucção}$: pressão de entrada (de sucção) da bomba

$P_{entrada}$: potência otimizada de entrada para o sistema

$PRHP$: potência da haste polida requerida na superfície

$\eta_{elevação}$: eficiência energética de elevação dos fluidos

$\eta_{mecânica}$: eficiência mecânica

P_{motor} : potência mecânica requerida pelo eixo do motor

η_{motor} : eficiência do motor

$P_{elétrica}$: potência elétrica requerida para o sistema

CA – Corrente Alternada

CAPES - Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior

WOS - Web Of Science

INPI - Instituto Nacional da Propriedade Industrial

CEO - Conversión de Energia de Oleaje

GEL – Gerador Elétrico Linear

MMLG - Moving Magnet Linear Generators

MILG - Moving Iron Linear Generators

MCLG - Moving Coil Linear Generators

MCILG - Moving Coil Iron Cored Linear Generator

MCCLG - Moving Coil Coreless Linear Generator

UM ESTUDO SOBRE A GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DE UM GERADOR LINEAR ACOPLADO A EQUIPAMENTO DE BOMBEIO MECÂNICO DE HASTES EM POÇOS DE PETRÓLEO

RESUMO

Levando-se em consideração que as fontes energéticas são em sua grande maioria, finitas e que podem contribuir de forma danosa ao meio ambiente, vários estudos têm sido desenvolvidos na área da conversão de energias associadas à natureza. Diante desse contexto, este trabalho foi desenvolvido com o objetivo de estudar possibilidades de geração de energia elétrica a partir de um gerador linear acoplado ao equipamento de bombeio mecânico de hastes, utilizado na completação de poços de petróleo *onshore*. Tal proposta é inovadora, pois não há relatos na literatura que apontem para esta recomendação. Foi feita uma pesquisa bibliométrica para investigar a relação entre reaproveitamento energético e as unidades de bombeio mecânico com hastes na indústria do petróleo. O estudo documental foi conduzido no Portal de Periódicos da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e os artigos que mais se aproximaram do estudo em questão foram selecionados. 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. Foi feita também uma pesquisa em patentes brasileiras que apresentam propostas de tecnologias relacionadas a esse tema, além de levantar informações sobre o funcionamento básico do sistema de bombeio mecânico de hastes em poços de petróleo assim como os principais custos envolvidos durante a produção com esse sistema e o seu respectivo balanço energético. A partir de dados obtidos na Agência Nacional de Petróleo (ANP), conheceu-se a distribuição nacional dos estados que utilizam esse método de elevação artificial de petróleo. O estudo estatístico da quantidade representativa de poços *onshore* em 2019 revelou que cerca 77% dos poços utilizam esse antigo método, mostrando o grande potencial de aplicação.

Palavras-chave: Bombeio mecânico de hastes. Gerador linear. Energia Elétrica. Poços de petróleo.

**A STUDY ON THE GENERATION OF ELECTRICITY FROM A LINEAR GENERATOR
COUPLED TO MECHANICAL PUMPING EQUIPMENT OF RODS IN OIL WELLS**

ABSTRACT

Taking into account that the vast majority of energy sources are finite and that they can contribute in a harmful way to the environment, several studies have been developed in the area of energy conversion associated with nature (waves, solar, vibration, wind) in electricity. Given this context, this work was developed with the objective of making a proposal for the generation of electric energy from a linear generator coupled to the mechanical rod pumping equipment, used in the completion of onshore oil wells. Such a proposal, if confirmed viable, is innovative, as there are no reports in the literature that point to this recommendation. A bibliographic research was carried out to gather information about the basic functioning of the mechanical rod pumping system in oil wells as well as the main costs involved during the production with this system and its respective energy balance. From data obtained at the National Petroleum Agency (ANP), the national distribution of the states that use this method of artificial oil elevation was known. The statistical study of the representative number of onshore wells in 2019 revealed that about 77% of the wells use this old method, showing the great potential for application if possible.

Keywords: *Mechanical pumping of rods. Linear generator. Electricity. Oil wells.*

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	vi
LISTA DE TABELAS.....	vii
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS.....	vii
RESUMO.....	ix
<i>ABSTRACT</i>	x
APRESENTAÇÃO	01
ARTIGO CIENTÍFICO 1: AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DE UM GERADOR LINEAR ACOPLADO A EQUIPAMENTO DE BOMBEIO MECÂNICO DE HASTES EM POÇOS DE PETRÓLEO	05
1. INTRODUÇÃO.....	07
2. REVISÃO DA LITERATURA.....	10
3. MATERIAL E MÉTODO.....	23
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	23
5. CONCLUSÃO.....	25
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	25
ARTIGO CIENTÍFICO 2: MÉTODOS ALTERNATIVOS PARA OTIMIZAÇÃO E REAPROVEITAMENTO ENERGÉTICO EM SISTEMAS DE BOMBEIO MECÂNICO DE HASTES NA INDÚSTRIA DE PETRÓLEO: UM ESTUDO BIBLIOMÉTRICO	28
1. INTRODUÇÃO.....	30
2. MÉTODO.....	32
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	33
4. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	52
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	53
CONCLUSÃO	56
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS DA DISSERTAÇÃO	58

APRESENTAÇÃO

Até o momento, a energia disponível e acessível contribuiu para a industrialização e para o desenvolvimento, mas com o crescimento acelerando nos países em desenvolvimento, a demanda por fontes de energia não renováveis está atingindo seus limites. Isto sugere, urgentemente, mudanças drásticas na maneira de gerar e fornecer energia. Para lidar com essas mudanças rápidas, é necessário desenvolver simultaneamente estratégias inovadoras para reduzir os custos de geração de energia a partir de fontes renováveis e desenvolver tecnologias mais ecológicas e baratas para produção e armazenamento de energia, garantindo a sustentabilidade a longo prazo (DUSASTRE *et al.*, 2017).

Diante dessa realidade, busca-se nesta dissertação, levantar possibilidades de economia na indústria de produção de petróleo onshore e mais especificamente, investigar, de forma inovadora, o que está sendo discutido sobre a otimização e a reutilização energética em sistemas de bombeio com hastes para propor o uso de gerador linear nas hastes do equipamento de bombeio mecânico.

A inspiração para este projeto veio da conversão de energia das ondas, que tem sido uma área ativa de pesquisa de energia renovável e um grande número de conceitos, patentes e dispositivos tem sido proposto neste processo, incluindo os chamados conversores de energia das ondas (WEC – *Wave Energy Converter*) (YU *et al.*, 2018). Cunha *et al.* (2017), apontaram o *Point Absorber* (sistema oscilante de simetria axial) como alternativa viável e interessante, sob o ponto de vista da capacidade de absorver energia incidente a partir de qualquer direção, quando comparado a outros WECs. Este dispositivo possui uma boia na superfície conectada a um gerador linear por meio de uma linha e conexão. O gerador é colocado em uma cápsula no fundo do mar. Devido ao movimento das ondas, a boia se move. Dentro do gerador linear o translador segue o movimento vertical ascendente e descendente, induzindo assim um fluxo magnético variável nos enrolamentos do estator (LEJERSKOG *et al.*, 2014). Ou seja: o movimento das ondas aciona diretamente o gerador linear para produção de energia.

Existem muitos princípios técnicos relatados em artigos e conferências sobre como converter a energia das ondas em energia elétrica por geradores lineares. Alguns desses princípios técnicos foram testados em ondas do mar, e os resultados dos testes provaram ser promissores, já que a energia elétrica pode ser obtida diretamente da energia das ondas sem transmissão mecânica complexa (GUODONG *et al.*, 2016).

Conforme a tecnologia de geração de energia se desenvolve, muitos tipos de geradores lineares têm despertado ampla atenção e discussão, como por exemplo, gerador linear de relutância comutado, gerador linear de comutação de fluxo magnético, gerador linear síncrono de ímã permanente, etc (JING

et al., 2019).

Conhecer o que esses autores têm proposto poderá auxiliar em inspirações para aplicações no projeto atual, principalmente na escolha do melhor tipo de gerador linear a ser testado.

Como relatado por Gao (2016), as pesquisas iniciais apontavam para inviabilidades do uso de geradores lineares, já que eram considerados muito pesados, ineficientes e caros. No entanto, com o desenvolvimento dos ímãs permanentes de alta densidade de energia e com os custos reduzidos de eletrônicos de conversão de frequência, o uso de geradores lineares começou a se tornar vantajoso.

O artigo de Huang *et al.*, (2015) comprova que, atualmente, os principais geradores lineares usados para a extração de energia das ondas são máquinas lineares síncronas de ímã permanente.

Baseado em resultados de dezoito geradores elétricos lineares, Liu *et al.*, (2020) concluem que o gerador linear síncrono de ímãs permanentes é uma solução forte para aplicações de energia das ondas inferiores a 10 kW.

Clement *et al.*, (2002), descrevem em sua publicação que a potência em uma onda é proporcional ao quadrado da amplitude e ao período do movimento. Portanto, ondas de longo período (7–10 s), grande amplitude (2 m) têm fluxos de energia comumente em média entre 40 e 70 kW.

De acordo com Cordovil (2013) a utilização de geradores lineares simplifica o processo de conversão, aproveitando diretamente o movimento oscilatório das ondas do mar. Representa a minimização da quantidade de processos para a conversão de energia e diminui, não apenas, a quantidade de equipamentos envolvidos na tomada de potência, mas também, o número de sensores deste processo. Espera-se que esta opção seja a que menos necessite de atividades de manutenção corretiva e que a sua menor eficiência e maior custo por kW instalado em relação às máquinas rotativas sejam justificados com a redução dos custos de receita. Esta opção é hoje possível através da ligação assíncrona à rede elétrica, com a utilização de conversores CA/CC e CC/CA que estão cada vez mais robustos e baratos. Entretanto, existem novos desafios, pois atualmente não se utilizam geradores lineares para a produção de energia elétrica em outras áreas, não existe um consenso sobre qual a melhor forma de construí-los e é uma aplicação de baixa velocidade. O protótipo que eles desenvolveram foi testado em ondas da costa portuguesa, que desenvolveu frequência elétrica média em um período mecânico de 2,64 Hz, velocidade linear média de 0,289 m/s e potência útil máxima de 17,8 W. A estimativa da potência produzida em escala real neste caso é de 795 W.

Gao e seus colaboradores (2016) mencionam que com o desenvolvimento de ímãs permanentes de alta densidade de energia, como o NeodímioFerroBoro (NdFeB) e os custos reduzidos de eletrônicos de conversão de frequência, as vantagens dos geradores lineares de acionamento direto tornam-se mais óbvio.

O estudo de Liu *et al.*, (2020) apresentou um conversor de energia utilizando um gerador linear

síncrono com ímãs permanentes. Com base nos parâmetros estruturais projetados, um protótipo foi fabricado. Os experimentos do protótipo foram conduzidos num tanque. O WEC desenvolvido pôde gerar até 7,94 W de energia nas condições em que o período de onda era 1,6 segundos e a altura da onda, 12 cm.

Como o movimento das hastes no equipamento de bombeio mecânico é vertical, pode-se supor que há uma semelhança com o movimento das ondas. Logo, propor a utilização de um gerador linear acoplado ao sistema para obter energia a partir do movimento das hastes, seria uma solução inovadora.

No Brasil são utilizadas unidades de bombeio do tipo Convencional, isto é, Classe I, com geometria descrita nos anexos da Norma API SPEC 11E. Os principais fornecedores que atendem operadoras na América do Sul e ao Brasil são a Lufkin, líder da indústria com mais de 100 anos de experiência, tendo fábrica instalada na Argentina; Weatherford, com fábricas nos Estados Unidos e na China. No Brasil, a fresadora Santana, com sede em São Paulo, tem o *know how* para fabricar as Unidades de Bombeio, mas não tem uma linha de produção instalada por não haver demanda para tal. Na China há outros fornecedores, porém de qualidade inferior aos líderes da indústria.

Costa (2020) menciona que é comum referir-se ao movimento das hastes na forma de curso em polegadas (in) e frequência de bombeamento em ciclos por minuto (cpm). A frequência de bombeamento tipicamente oscila entre 8 e 16 cpm. Já o curso depende do porte da unidade. Geralmente esses valores ficam entre 48 e 120 in. A potência do motor depende da profundidade, vazão, tamanho da unidade e condições operacionais. Tipicamente fica entre 20 e 100 cv.

A estrutura desta pesquisa será apresentada na forma de dois artigos científicos. Esta busca produziu o primeiro artigo científico em maio de 2020. Nesta etapa inicial, foi possível realizar uma atualização sobre o funcionamento básico do sistema de bombeio mecânico de hastes em poços de petróleo e também dos principais custos envolvidos durante a produção com esse sistema e o seu respectivo balanço energético. Para isso, foi feito um levantamento bibliográfico em fontes científicas nacionais e internacionais. Trata-se, portanto de uma pesquisa com abordagem exploratório-descritiva.

Além disso, baseado em bases de dados da Agência Nacional do Petróleo (ANP), foi feito o levantamento da utilização desse método artificial no Brasil.

Os dados obtidos, para o ano de 2019, revelaram que cerca 77% dos poços utilizam esse método de elevação artificial do petróleo, mostrando o grande potencial de aplicação, caso seja possível. O maior impacto seria no estado do Rio Grande do Norte, que possui 64% dos poços em todo o território brasileiro.

O segundo artigo foi concluído em agosto de 2021. Por meio da técnica de bibliometria foi elaborado um referencial teórico relevante sobre métodos alternativos para otimização e reutilização energética para o sistema de bombeio mecânico por hastes, sendo 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.

O estudo não foi conclusivo em relação à viabilidade do projeto. Trabalhos futuros devem propor um protótipo para teste e posteriormente testá-lo em um equipamento *in loco*.

ARTIGO CIENTÍFICO 1

AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DE UM GERADOR LINEAR ACOPLADO A EQUIPAMENTO DE BOMBEIO MECÂNICO DE HASTES EM POÇOS DE PETRÓLEO

EVALUATION OF THE POTENCIAL OF ELECTRIC POWER GENERATION FROM A LINEAR GENERATOR COUPLED TO ROD PUMPING EQUIPMENT IN OIL WELLS

Leandro Ferreira de Souza - IFFluminense/PPEA

Marcos Antonio Cruz Moreira - IFFluminense/PPEA

Eduardo Beline da Silva Martins - IFFluminense

RESUMO

Uma quantidade significativa de poços em todo o mundo ainda depende do antigo mecanismo de bombeio mecânico de hastes, um tipo de elevação artificial de petróleo. O método é popular devido à sua simplicidade, confiabilidade e aplicabilidade. A pesquisa feita nesse artigo apresenta uma abordagem exploratório-descritiva com revisão bibliográfica sobre o assunto, além de um levantamento quantitativo, baseado em bases de dados da Agência Nacional do Petróleo, da utilização desse método artificial no Brasil. Os resultados indicaram que no período de janeiro a outubro de 2019, 77% de todos os poços produtores onshore utilizaram este sistema. Esses equipamentos utilizam energia elétrica para transformar o movimento rotativo em movimento alternativo. Sabe-se que o custo da energia elétrica ao longo dos anos tem aumentado e como a maioria das aplicações onshore exige motores elétricos, as perdas de energia devem ser minimizadas. Por esta razão, propor a utilização de um gerador linear acoplado ao sistema para obter energia a partir do movimento das hastes, seria uma solução inovadora.

Palavras-chave: Bombeio mecânico de hastes. Gerador linear. Energia Elétrica. Poços de petróleo.

ABSTRACT

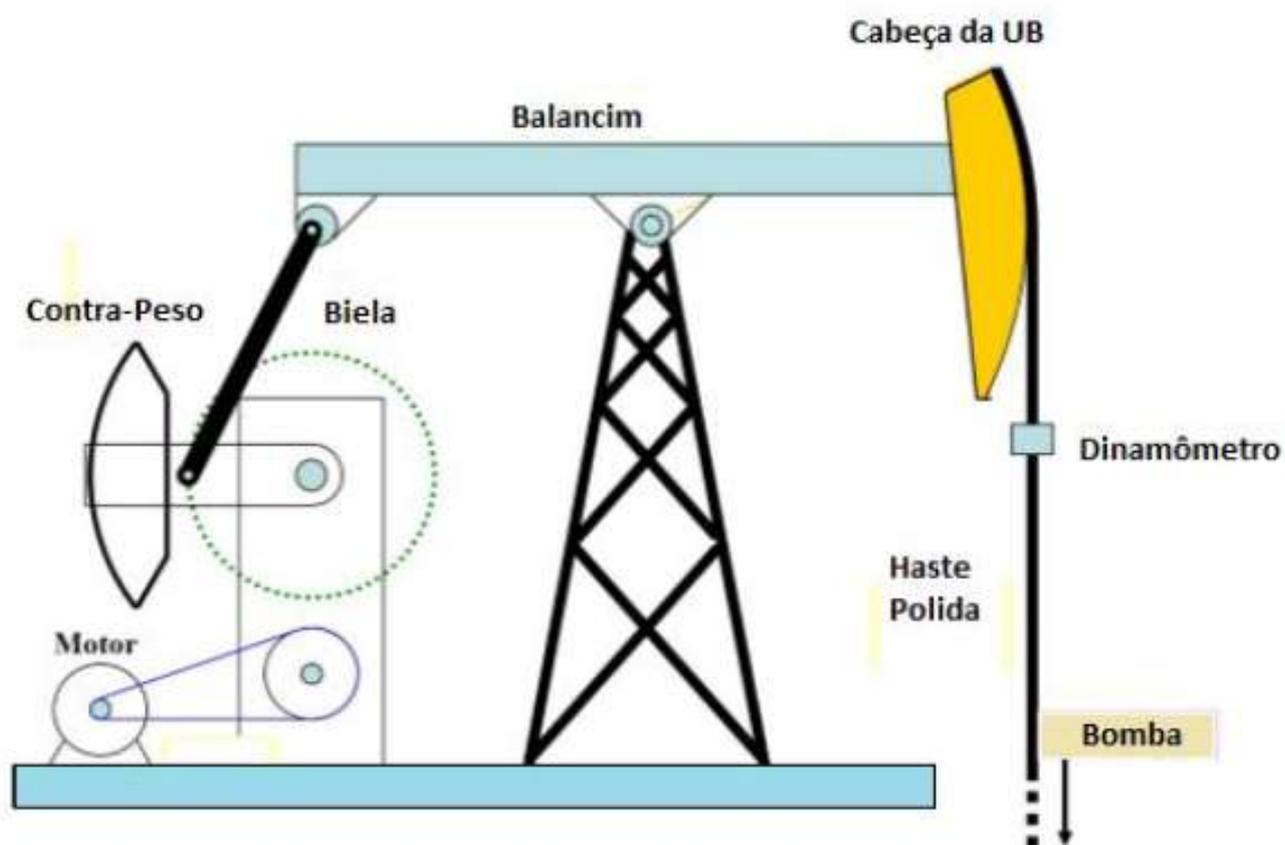
A significant number of wells worldwide still depend on the old mechanical rod pumping mechanism, a type of artificial oil lift. The method is popular due to its simplicity, reliability and applicability. The research carried out in this article presents an exploratory-descriptive approach with bibliographic review on the subject, in addition to a quantitative survey, based on databases of the National Petroleum Agency, of the use of this artificial method in Brazil. The results indicated that in the period from January to October 2019, 77% of all onshore wells used this system. This equipment uses electrical energy to transform the rotary movement into an alternative movement. It is known that the cost of electricity over the years has increased, and as most onshore applications require electric motors, energy losses must be minimized. For this reason, proposing the use of a linear generator coupled to the system to obtain energy from the movement of the rods, would be an innovative solution.

Keywords: Mechanical pumping of rods. Linear generator. Electricity. Oil wells.

1. INTRODUÇÃO

Ao longo da vida produtiva de um reservatório de petróleo típico, a força natural de elevação devida à pressão do fluido tende a decair e diminuir. Portanto, métodos de elevação artificial devem ser utilizados para transferir energia ao óleo e gás da formação para a superfície. Uma das primeiras invenções para campos de petróleo *onshore* foi o sistema de bombeio mecânico de hastes (Figura 1), um dos sistemas de elevação artificial mais eficientes e populares na indústria de petróleo. Mais de 80% dos poços em todo o mundo ainda dependem desse antigo mecanismo (WANG *et al.*, 2019).

Figura 1. Principais partes do sistema de bombeio mecânico de hastes



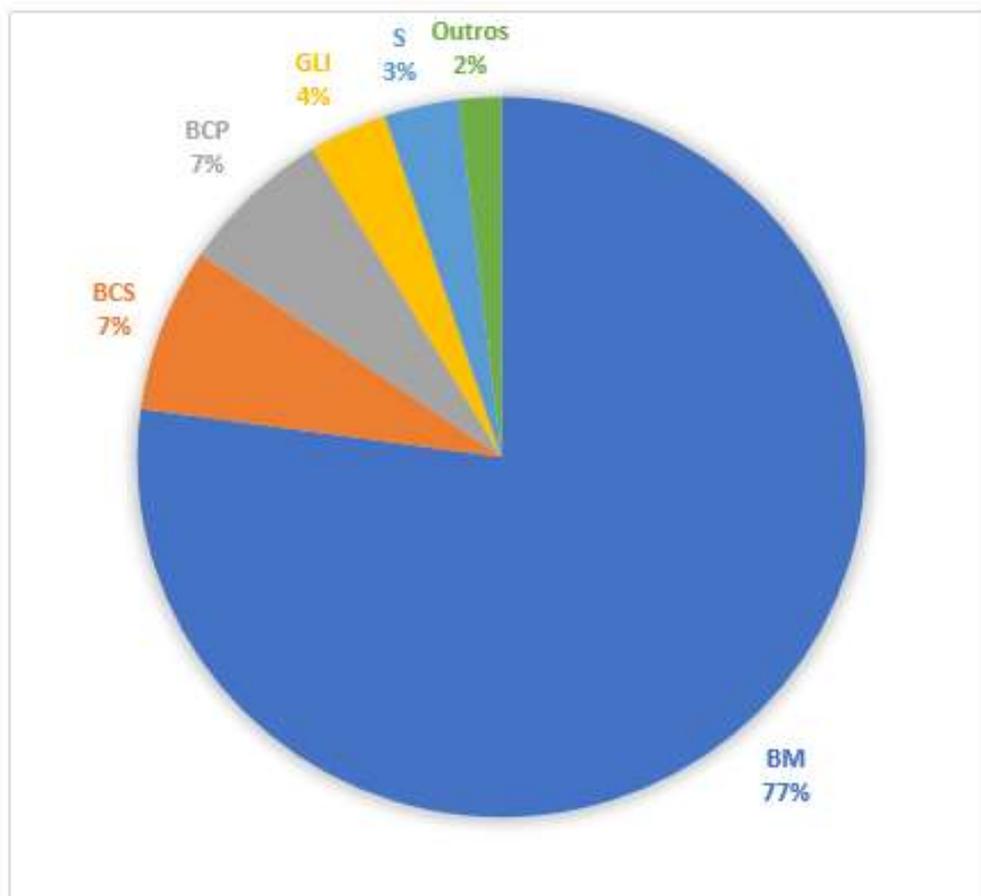
Fonte: Bastos (2017)

Resumidamente, pode ser descrito da seguinte forma: o movimento rotativo de um motor elétrico ou de combustão interna é transformado em movimento alternativo por uma unidade de bombeio localizada próxima à cabeça do poço. Uma coluna de hastes transmite o movimento alternativo para o fundo do poço, acionando uma bomba que eleva os fluidos produzidos pelo reservatório para a superfície (THOMAS, 2001).

Nos Estados Unidos, mais de 85% dos poços ativos utilizam o método, que é popular devido à sua simplicidade, confiabilidade e aplicabilidade. Também é reconhecido que nos campos petrolíferos da Rússia a grande maioria dos poços de petróleo é operada usando as unidades de bombeio de haste (ALIEV *et al.*, 2018).

A figura 2 mostra como o número de instalações com essa técnica se destaca no Brasil. Após o tratamento de dados obtidos via Sistema Eletrônico do Serviço de Informações ao Cidadão (e-SIC, 2019) foi possível comprovar que 77% dos poços brasileiros *onshore* utilizaram, como método de elevação artificial, o bombeio mecânico de hastes de janeiro a outubro de 2019. A cor azul escuro relaciona-se com o bombeio mecânico. Outros métodos de elevação artificial são representados por outras cores, como o Bombeio Centrífugo Submerso (BCS), o Bombeio por Cavidades Progressivas (BCP), o Gás Lift Intermitente (GLI), além da Surgência (S).

Figura 2. Métodos de elevação em poços onshore em produção no Brasil em 2019



Fonte: e-SIC, 2019. Elaboração dos autores.

A tabela 1, que contém dados retirados do Anuário Estatístico da Agência Nacional do Petróleo de 2019 (ANP, 2019), publicado no dia 27 de junho de 2019, demonstra que cerca de 4,3% da produção

de óleo nacional em 2018 foi oriunda de poços *onshore*.

Tabela 1. Produção de petróleo (mil barris) em 2018

UNIDADE DA FEDERAÇÃO	LOCALIZAÇÃO	PRODUÇÃO DE PETRÓLEO EM 2018 (MIL BARRIS)
BRASIL		944.117
Subtotal	Terra	40.648
	Mar	903.470

Fonte: Anuário Estatístico da ANP de 2019, ANP (2019)

Aplicando-se a porcentagem de 77% obtida na figura 2, pode-se estimar que cerca de 3,3% do volume de óleo nacional é produzido por poços *onshore* que utilizam o método de elevação artificial de bombeio mecânico com hastes, o que é bastante significativo.

O objetivo da otimização de uma elevação artificial é alcançar o lucro máximo das operações de produção de petróleo. Para isso, é preciso minimizar os custos de produção, que são, basicamente, determinados pelos custos de energia; principalmente o custo de operação dos motores elétricos. Existem, é claro, outros tipos de custos que estão envolvidos na produção, como manutenção, por exemplo; mas sua importância é muito menor. (TAKACS, 2010).

Em todo o mundo busca-se um menor consumo de energia. Por esta razão, a redução de perdas de energia e a eficiência energética tornaram-se importantes para os processos decisivos envolvendo despesas operacionais em campos que utilizam este tipo de sistema (BASTOS, 2017).

Diante desse contexto, esse artigo tem como objetivo apresentar uma revisão bibliográfica sobre o funcionamento básico do sistema de bombeio mecânico de hastes em poços de petróleo assim como os principais custos envolvidos durante a produção com esse sistema e o seu respectivo balanço energético.

E, após levantar os dados de utilização deste método de elevação artificial no Brasil, avaliar o potencial de geração de energia elétrica a partir de um gerador linear acoplado ao equipamento, haja vista a demanda atual do planeta pelo uso eficiente de energia.

Um desafio que deve ser resolvido em estudos posteriores é a interação do gerador linear no balanço energético. Segundo Martins *et al.* (2019), um gerador linear possui uma parte fixa chamada estator e uma parte móvel chamada translador. Quase todos os geradores lineares de ímã permanente possuem um translador pesado e sólido devido às suas limitações de projeto para geração de eletricidade. O movimento do translador não é livre e há uma força denominada *cogging force* que atua provocando resistência ao seu movimento de translação. No estudo de Arof *et al.* (2004), eles ressaltam que essa força atua como retenção ao movimento e pode causar vibrações e ruído. Os autores também simulam possibilidades de reduzir essa força de retenção, aumentando a distância entre o

translador e a estrutura ferro magnética do estator. Porém, uma consequência desta alteração é a redução da tensão elétrica gerada.

A inspiração para este projeto veio da conversão de energia das ondas, que tem sido uma das áreas mais ativas de pesquisa de energia renovável e um grande número de conceitos, patentes e dispositivos tem sido proposto neste processo, incluindo os chamados conversores de energia das ondas (WEC – *Wave Energy Converter*) (YU *et al.*, 2018).

Cunha *et al.* (2017), em revisão bibliográfica, apontaram o *Point Absorber* (sistema oscilante de simetria axial) como alternativa viável e interessante, sob o ponto de vista da capacidade de absorver energia incidente a partir de qualquer direção, quando comparado a outros WECs.

Este dispositivo possui uma boia na superfície conectada a um gerador linear por meio de uma linha de conexão. O gerador é colocado em uma cápsula no fundo do mar. Devido ao movimento das ondas, a boia se move. Dentro do gerador linear o translador segue o movimento vertical ascendente e descendente, induzindo assim um fluxo magnético variável nos enrolamentos do estator. (LEJERSKOG *et al.*, 2014). Ou seja: o movimento das ondas aciona diretamente o gerador linear para produção de energia.

Como o movimento das hastes no equipamento de bombeio mecânico é vertical, pode-se supor que há uma semelhança com o movimento das ondas. Logo, propor a utilização de um gerador linear acoplado ao sistema para obter energia a partir do movimento das hastes, seria uma solução inovadora.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1 A demanda por energia renovável e as pesquisas por extração de energia das ondas

Assim como o reaproveitamento e o uso eficiente da energia propostos neste trabalho, estudos que buscam formas de converter a energia renovável, presente na natureza, em energia elétrica ganham adeptos ano a ano. Os constantes debates sobre a relação de geração de energia e as mudanças climáticas demonstram que é necessário investir em novas tecnologias de geração de energia por fontes renováveis. (HARJANNE *et al.*, 2019).

A Administração de Informação Energética dos Estados Unidos define energia renovável como “energia proveniente de fontes que são naturalmente reabastecidas, mas com fluxo limitado”. Segundo esta definição os recursos renováveis têm duração praticamente inesgotável, mas são limitados na quantidade de energia disponível por unidade de tempo. Menciona energia solar, eólica, geotérmica, hídrica e biomassa como exemplos de energia renovável (EIA, 2019). A necessidade de energia não

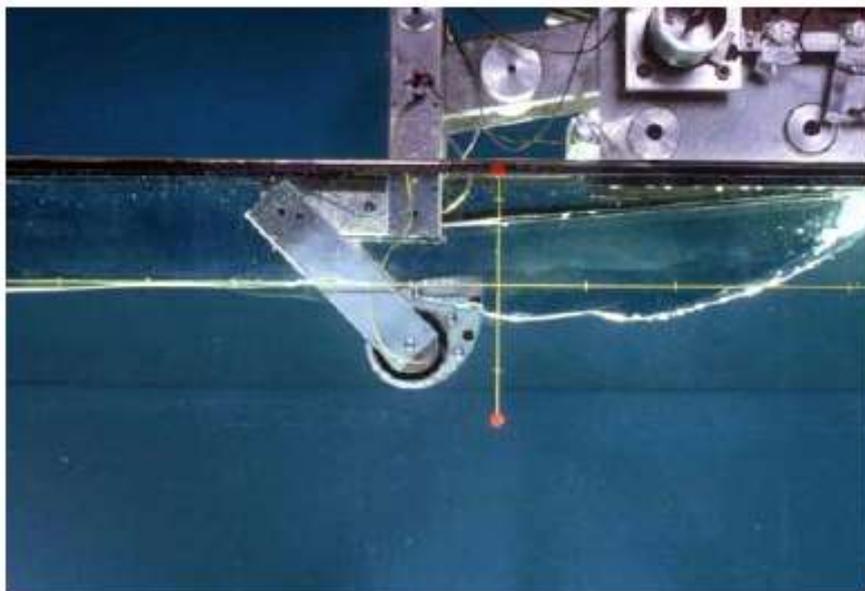
poluente levou ao desenvolvimento de uma ampla variedade de tecnologias para captar energia das ondas oceânicas, que apresenta um enorme potencial estimado em cerca de 2,11 TW, porém ainda é amplamente inexplorado. Espera-se que essas tecnologias forneçam quantidades significativas de energia para redes elétricas mundiais, contribuindo com sua participação para a meta de 337 GW de energia oceânica até 2050, o que representa um grande passo para o mundo se tornar menos dependente de combustíveis fósseis para geração da eletricidade (ROSA *et al.*, 2019).

A energia das ondas pode ser captada por dispositivos chamados, genericamente, de conversores de energia das ondas – WEC (*Wave Energy Converter*). Existem vários desafios técnicos que precisam ser superados para aumentar o desempenho e, conseqüentemente, a competitividade comercial dos dispositivos conversores de energia de ondas no mercado de energia mundial. Como as ondas variam de altura e período, seus respectivos níveis de potência também variam. Isso é considerado um desafio significativo. Além disso, a direção da onda é altamente variável e, portanto, os dispositivos precisam se alinhar em conformidade a fim de capturar a energia possível (DREW *et al.*, 2009)

Em geral, os conceitos de dispositivos de energia das ondas se enquadram em três categorias principais: terminadores, atenuadores e *Point Absorbers* (NOAD *et al.*, 2017).

Os terminadores são dispositivos que têm seu eixo principal paralelo à frente da onda (perpendicular à direção da onda) e intercepta fisicamente as ondas. (DREW *et al.*, 2009)

Figura 3: Exemplo de terminadores



Fonte: Drew et al. (2009)

Enquanto isso, os atenuadores se estendem paralelamente à direção da onda incidente com a intenção de extrair progressivamente energia ao longo do comprimento do dispositivo (NOAD *et al.*, 2017).

Figura 4: Exemplo de atenuadores



Fonte: Drew *et al.* (2009)

Os *Point Absorbers* possuem, relativamente, uma dimensão pequena em comparação ao comprimento de onda incidente (NOAD *et al.*, 2017). Trata-se de uma estrutura flutuante que se move para cima e para baixo na superfície da água ou submersa. Por causa do tamanho pequeno, a direção da onda não é importante para esses dispositivos (DREW *et al.*, 2009).

Figura 5: Exemplo de point absorber



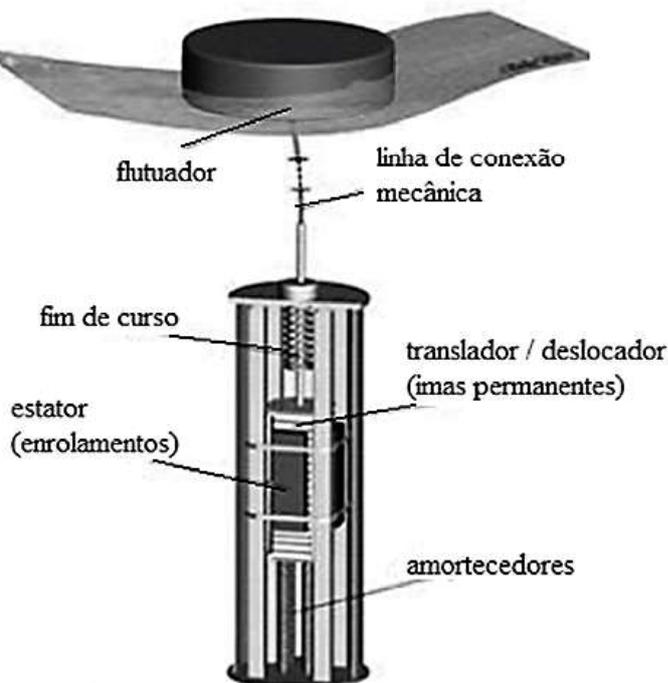
Fonte: Drew *et al.* (2009)

Eles tornaram-se um dos WECs mais estudados. Geralmente são projetados para operar na superfície da água ou logo abaixo dela, extraindo a energia das ondas a partir do movimento de elevação das ondas (SERGIENKO *et al.*, 2017).

O dispositivo absorve energia a partir de todas as direções de ondas, convertendo o movimento induzido nos flutuadores em energia elétrica (WANG *et al.*, 2018).

Elevam-se para cima e para baixo em relação à superfície da água do mar e acionam, por meio de um cabo tensionado, um atuador ou um cilindro hidráulico, fixado no fundo do mar e conectado a um gerador elétrico (PISCOPO *et al.*, 2016).

Figura 6: Esquema de um WEC Point Absorber



Fonte: Cunha et al. (2017)

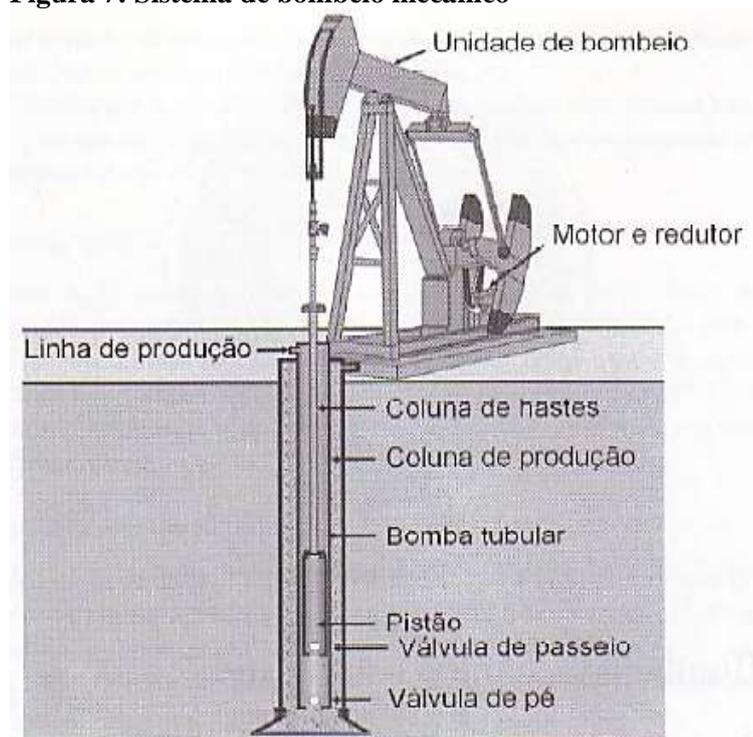
Este modelo de dispositivo quando utiliza uma boia para captação de energia das ondas, encontra no gerador linear uma interessante interação sob o ponto de vista da transferência de energia que normalmente ocorre de forma direta. O gerador linear tem a capacidade de transformar o deslocamento vertical, gerado pela passagem das ondas, em eletricidade. Esse sistema oferece a possibilidade de converter diretamente energia mecânica em energia elétrica. (DREW *et al.*, 2009).

O princípio de funcionamento de um gerador linear é exatamente igual ao de um gerador convencional. A única diferença consiste na forma como se estabelece o movimento relativo entre as bobinas de cada fase e o sistema de excitação, sendo, neste caso, um movimento linear. A parte fixa dos geradores lineares é chamada de estator e a parte móvel é chamada de translador. A geração de energia se dá quando o conjunto de ímãs permanentes se move em relação a uma bobina de enrolamento. Esse movimento alternativo modifica o fluxo de corrente elétrica nos fios do enrolamento da bobina (MARTINS, 2019).

2.2 O Sistema de Elevação Artificial de Bombeio Mecânico de Hastes

O método funciona mediante seus elementos específicos, divididos entre componentes de superfície e de subsuperfície. Os componentes de superfície são o motor, a unidade de bombeio (UB) composta pela cabeça da UB, tripé, bielas, haste polida, contrapesos, manivela, redutor e viga. Já a parte de subsuperfície é constituída pela coluna de hastes, bomba de fundo (camisa, pistão, válvula de passeio e válvula de pé) e coluna de produção. Essas partes estão ilustradas na Figura 7 (GALVÃO *et al.*, 2018).

Figura 7: Sistema de bombeio mecânico



Fonte: Thomas (2001)

A parte mais vital do sistema é a coluna de hastes. Sua operação livre de problemas é fundamental para o desempenho de todo o sistema. Ela é composta por hastes e faz a ligação entre a unidade de superfície e a bomba de subsuperfície (TAKACS, 2002).

Esta bomba de subsuperfície tem a função de fornecer energia ao fluido vindo da formação, elevando-o para a superfície. A transmissão de energia ao fluido ocorre sob a forma de aumento de pressão (THOMAS, 2001).

A propriedade mais básica de qualquer coluna de hastes é a sua elasticidade, comportamento responsável pela complexidade de sua operação. As forças que excitam a coluna nas duas extremidades (na superfície através da haste polida e na extremidade inferior da bomba) produzem ondas de força

elástica que percorrem o material da haste com a velocidade do som. Essas ondas são de diferentes magnitudes e fases, e sua interferência e reflexão podem muito afetar as forças reais que ocorrem em qualquer seção da haste. Devido à complexidade ao se descrever essas ondas, a maioria dos procedimentos de projeto de coluna de haste desconsidera as cargas da haste decorrentes de tais efeitos. (TAKACS, 2002).

A primeira haste no topo da coluna é chamada de haste polida, por ter a sua superfície externa polida, que proporciona melhor vedação na cabeça do poço. Devido ao movimento alternativo da coluna de hastes, a haste polida está continuamente entrando e saindo do poço. A seção na coluna de hastes sujeita à maior força de tração está na haste polida, pois sustenta as seguintes cargas:

a) Peso das hastes (P_h): é o peso da coluna de hastes medido no ar;

b) Força de empuxo (F_e): esta força é igual ao peso do fluido deslocado de hastes;

c) Força de aceleração (F_{ac}): é a força responsável pela variação da velocidade das hastes. A velocidade é nula ao atingir o ponto mais alto e o ponto mais baixo do ciclo e conseqüentemente, são os pontos onde ocorrem os valores máximos de aceleração;

d) Força de fricção (F_f): atua no sentido oposto do movimento e é devida ao atrito entre das hastes com o fluido e com a coluna de produção;

e) Peso do fluido (P_f): é o peso da coluna de fluido que está acima do pistão. Atua somente no curso ascendente, quando todo o fluido que está na coluna de produção é sustentado pela válvula de passeio.

A carga (F) medida por um dinamômetro na haste polida é a soma algébrica de todas as cargas anteriormente citadas, ou seja: $F = P_h + F_e + F_{ac} + F_f + P_f$. Esta é a carga que está solicitando a unidade de bombeio na superfície. O seu valor varia continuamente durante o ciclo, porém é sempre positivo ou nulo (THOMAS, 2001).

No curso ascendente o motor é bastante solicitado para elevar os fluidos acima do pistão. No curso descendente, a força da gravidade é responsável pelo movimento das hastes. Assim, o motor funciona de forma cíclica, o que prejudica sua vida útil. A fim de minimizar este tipo de problema são utilizados os contrapesos na manivela ou na viga. Há vários modelos de unidades de bombeio, embora todos possuam os mesmos componentes básicos, diferenciam-se na geometria. Na indústria de petróleo são encontrados quatro tipos de unidades de bombeio. O modelo convencional, o balanceado a ar (*air balanced*), o *Mark II* e o *Torqmaster*. A seleção de unidades de bombeio está relacionada ao conhecimento de alguns parâmetros operacionais, tais como: o curso máximo da haste polida, a carga máxima na viga e o torque máximo na caixa de redução (NASCIMENTO, 2005).

2.3 Custos envolvidos durante a produção com o sistema de bombeio mecânico de hastes

Os custos com manutenção e intervenção, assim como os custos associados com energia elétrica são variáveis que refletem em acréscimos no custo final de produção de um poço de petróleo.

Ramírez *et al.* (2007) realizaram um estudo nos campos de Teca e Nare, localizados no Vale Médio da Bacia do Rio Magdalena, na Colômbia e operados pela empresa Omimex Colombia, onde houve troca do sistema de elevação artificial de bombeio mecânico de hastes para o sistema de bomba de cavidade progressiva (BCP). Os pesquisadores relataram que o sistema de bombeio mecânico de hastes apresentou algumas desvantagens sobre o consumo de energia, como por exemplo um consumo alto para iniciar a unidade, pois necessitava superar a inércia do sistema e permanecer constante porque dependia diretamente do valor nominal da velocidade do motor. Uma das principais vantagens obtidas na mudança do sistema foi a alteração de um motor de 50 HP usado pelo sistema de bombeio de hastes para motores de 10, 20 e 30 HP solicitados para o BCP. No bombeio mecânico de hastes, a energia necessária é gasta para elevar o fluido acima do pistão e depende das características do fluido, diâmetro do pistão e da profundidade de assentamento da bomba. Se a unidade está bem equilibrada, o motor fornece apenas a energia necessária para elevar a coluna de fluido, caso contrário, usa energia extra para elevar a coluna de hastes, consumindo quantidade extra de energia. O equilíbrio adequado da unidade é necessário para otimizar o uso de energia, mas pode tornar-se difícil operacionalmente devido às dinâmicas das condições de poço.

Ramírez *et al.* (2007) em sua avaliação econômica, consideraram os custos associados à manutenção, consumo de energia e serviço de poço. Para a avaliação do custo de energia, inicialmente foram avaliados os diferentes circuitos de energia no Campo de Teca com o objetivo de estimar um valor representativo do consumo de potência no sistema de bombeio mecânico de hastes em (kWh/dia). Foi escolhido o circuito 5, com 46 poços, onde 42 estavam ativos. Foi registrado o consumo entre fevereiro e agosto de 2005 com medidores de potência colocados na central elétrica no campo de Teca. As medições são mostradas na tabela 2.

Tabela 2. Consumo de Energia com Bombeio Mecânico com Hastes

Mês (2005)	Consumo Total (Kwh/dia)	Média de poços em operação	Consumo diário (Kwh/dia/Poço)
Fevereiro	4371	31	141
Março	4181	32	131
Abril	4136	31	133
Mai	4003	30	131
Junho	4160	31	133
Julho	4026	29	137
Agosto	4428	30	147
Média	4186	31	136

Fonte: Adaptada pelos autores

Conclui-se a partir dos dados que um sistema de bombeio de hastes consumia, em média, 136 kW/dia em cada poço, sendo que o valor depende de quão bem equilibrada está a unidade. O custo de energia naquela época foi mensurado no valor de US \$ 0,06 por kW/h. O custo diário estimado de energia para os poços ativos foi em média, US \$ 8,16 (RAMÍREZ *et al.*, 2007).

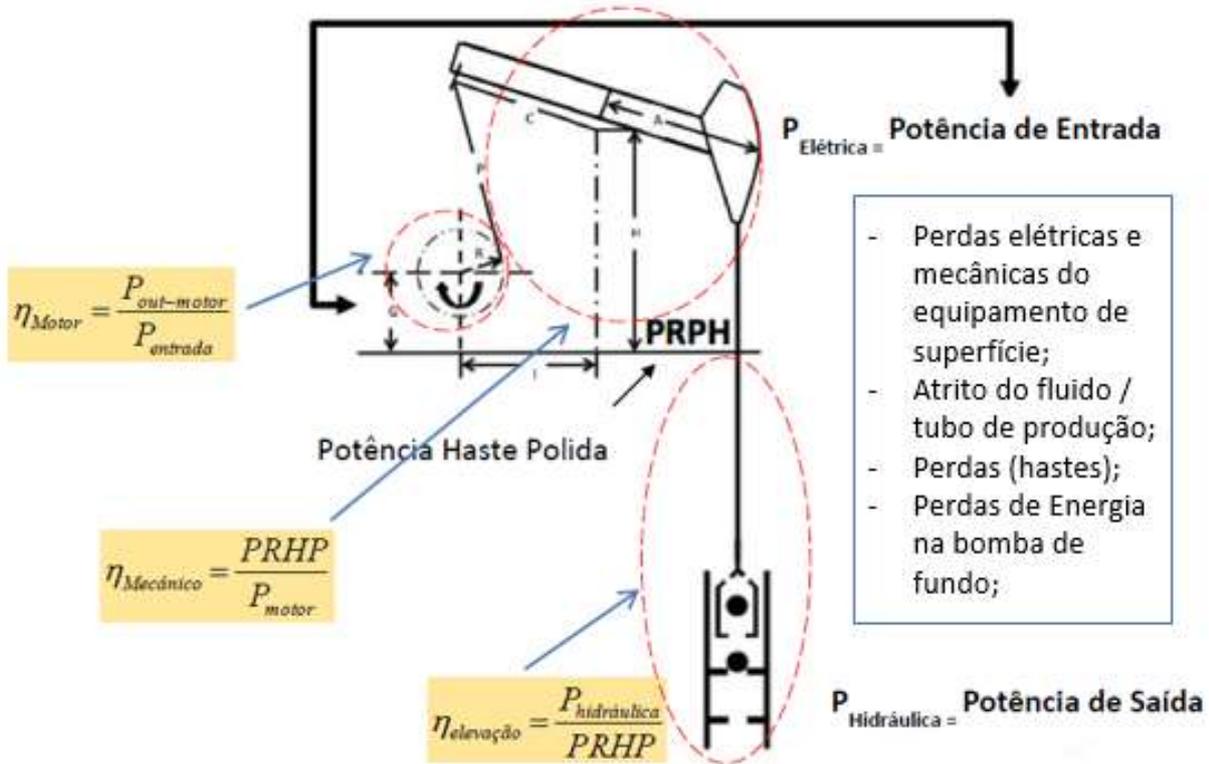
Hoje em dia, a utilização eficiente de energia é uma tarefa muito importante. O principal objetivo do uso racional de energia ou eficiência energética é reduzir a quantidade de energia necessária para o menor nível possível alcançando o mesmo resultado, seja aplicado em produtos, processos ou serviços. A indústria de petróleo usa grande quantidade de energia para a extração de recursos. Levando em consideração a queda de preço do petróleo nos últimos tempos e a manutenção da produção para atender as expectativas do mercado, a eficiência energética aplicada aos métodos de produção podem contribuir para a redução de custos (BASTOS, 2017).

2.4 Balanço energético no sistema de bombeio mecânico de hastes

Embora as unidades de bombeio de hastes serem tão utilizadas em todo o mundo, ainda são altamente ineficientes em termos dos valores reais da energia consumida. Estudos têm demonstrado que o sistema tem uma eficiência energética de cerca de apenas 50%. Ao utilizar um motor elétrico, apenas 50% da energia elétrica consumida é convertida em potência hidráulica, com o restante sendo perdido em atrito ou outras ineficiências (BASTOS, 2017).

Abaixo segue uma análise integrada envolvendo o motor, equipamentos de superfície e equipamentos do fundo do poço para obter o desempenho do sistema, segundo observado por Bastos (2017). A figura demonstra o fluxo de energia no sistema de bombeio mecânico.

Figura 8. Perda de energia no sistema



Fonte: Bastos (2017)

A eficiência energética dos componentes do sistema pode ser caracterizada pela busca de reduzir os custos operacionais, por meio da redução de perdas de energia nos sistemas de elevação artificial. Se as potências de entrada e saída do sistema de elevação artificial são conhecidas, a eficiência geral do sistema pode ser facilmente definida (TAKACS, 2010).

A entrada de potência no sistema ocorre por meio do motor. A bomba de subsuperfície eleva os fluidos do reservatório para a superfície por meio da energia transferida pela coluna de hastes a ela. Logo, deve-se considerar uma potência de entrada que consiga elevar o fluido para a superfície e superar as perdas de energia que ocorrem no processo (BASTOS, 2017).

A potência de saída é representada pela energia hidráulica para a elevação dos fluidos pela bomba. Com base nesses dois parâmetros, a eficiência energética geral pode ser definida por TAKACS, 2010, como:

$$\eta_{\text{sistema}} = \frac{P_{\text{hidráulica}}}{P_{\text{entrada}}} \quad (1)$$

onde:

$P_{hidráulica}$: energia hidráulica usada para a elevação de fluidos

$P_{entrada}$: energia elétrica fornecida ao sistema

A potência hidráulica é calculada a partir da equação (TAKACS, 2010):

$$P_{hidráulica} = 1,7 \times 10^{-5} q_l [0,433GL - P_{sucção}] \quad (2)$$

onde:

q_l : energia hidráulica usada para a elevação de fluidos

G : gravidade específica do líquido produzido

L : profundidade da bomba, em ft

$P_{sucção}$: pressão de entrada (de sucção) da bomba

Resolvendo a equação (1), encontra-se, segundo TAKACS, 2010, a potência otimizada de entrada para o sistema, que representa a potência mínima possível necessária para elevar os fluidos do poço para a superfície.

$$P_{entrada} = \frac{P_{hidráulica}}{\eta_{sistema}} \quad (3)$$

Diferentes tipos de perdas que ocorrem no fundo do poço e nos componentes de superfície aumentam a necessidade de energia elétrica do sistema no motor principal. A decomposição dessas perdas é descrita a seguir (TAKACS, 2010).

2.4.1 Perdas no poço

As perdas de energia no poço envolvem interações que ocorrem na bomba, na coluna da haste e na coluna de líquido que será elevada para a superfície. As perdas da bomba incluem o atrito mecânico e hidráulico entre a bomba e suas válvulas. Perdas na coluna da haste são causadas por atrito mecânico entre o tubo e a corda da haste. Perdas na coluna de fluido ocorrem no espaço anular e na cabeça do poço devido a perdas de pressão de fluxo (TAKACS, 2010).

2.4.2 Perdas na superfície

Na superfície, as perdas de energia ocorrem em vários locais, desde a haste polida até as conexões elétricas do acionador principal. Podem ser classificadas como perdas mecânicas, causadas por atrito mecânico na unidade de bombeio, caixa de engrenagens e correia; e perdas no motor principal, que são parcialmente mecânicas (atrito nos rolamentos) e parcialmente elétricas (TAKACS, 2010).

Bastos (2017) ressalta que por ser a unidade de bombeio um sistema complexo, algumas perdas de energia não podem ser calculadas. Dessa forma, uma aproximação da eficiência geral do sistema poderia ser demonstrada através do cálculo da eficiência de elevação, da eficiência mecânica e da eficiência do motor elétrico.

2.4.3 Eficiência de elevação

A energia mecânica necessária para operar a haste polida na superfície é a soma do trabalho útil realizado pela bomba mais todas as perdas de energia do fundo do poço, detalhadas anteriormente. A quantidade deste trabalho é diretamente proporcional à potência da haste polida (PRHP), que representa a força mecânica exercida na haste polida e pode ser encontrada de várias maneiras. A solução mais confiável envolve fazer uma carta dinamométrica e realizar cálculos com base na área do cartão. No entanto, a solução da equação de onda amortecida fornece boas estimativas para casos usando qualquer tipo de geometria da unidade de bombeio. Com base nessas considerações, a eficiência energética de elevação dos fluidos à superfície é o quociente da potência hidráulica útil e da potência necessária na haste polida (TAKACS, 2010):

$$\eta_{\text{elevação}} = \frac{P_{\text{hidráulica}}}{PRHP} \quad (4)$$

onde:

PRHP: potência da haste polida requerida na superfície, em HP

O uso da eficiência de elevação elimina a necessidade de atribuir valores de eficiências individuais, principalmente duvidosos, a cada tipo particular de perda no fundo do poço, uma vez que a eficiência de elevação inclui os efeitos de todos eles (TAKACS, 2010).

2.4.4 Eficiência mecânica

As perdas mecânicas de energia que ocorrem nos equipamentos de superfície abrangem as perdas por atrito decorrentes da unidade de bombeio da caixa de engrenagens e do acionamento por correias. Devido a esses efeitos, a potência mecânica necessária no eixo do motor será maior que a potência requerida da haste polida, PRHP. Dessa forma, a eficiência mecânica pode ser determinada pela potência da haste polida e a potência do motor fornecida ao sistema (TAKACS, 2010).

$$\eta_{mecânica} = \frac{PRHP}{P_{motor}} \quad (5)$$

onde:

P_{motor} : potência mecânica requerida pelo eixo do motor, em HP.

2.4.5 Eficiência do motor

A eficiência do motor é um dos parâmetros mais importantes a ser calculado, pois a eficiência energética do sistema está diretamente relacionada com a escolha e o funcionamento do motor. Os custos de energia são significantes no custo de operação do sistema e sua eficiência pode ser descrita pela potência de entrada necessária para suprir todo o sistema e a potência dada no eixo do motor. Sendo assim, a eficiência do motor pode ser calculada como (BASTOS, 2017):

$$\eta_{motor} = \frac{P_{motor}}{P_{elétrica}} \quad (6)$$

onde:

$P_{elétrica}$: potência elétrica requerida para o sistema, em HP

Como exemplo, pode-se citar a linha W22Xdb WEG, que representa o que há de mais moderno para o acionamento de equipamentos em ambientes com a presença de atmosferas explosivas. O modelo diferenciado, o W22Xdb WELL, atende os requisitos específicos da norma N-2919 da Petrobras, referência mundial na extração e refino de Petróleo e derivados. Segundo o fornecedor WEG, este motor oferece o máximo em desempenho e disponibilidade para a planta. O rendimento catalogado, para uma estimativa conservadora da aplicação neste tipo de carga é de 90 %, segundo catálogo obtido no site da empresa WEG (Linha W22Xdb WEG, Brasil).

2.4.6 Eficiência total do sistema

Considerando os cálculos das principais eficiências, Takacs (2010) propôs a seguinte definição da eficiência geral do sistema:

$$\eta_{sistema} = \eta_{elevação} \eta_{mecânica} \eta_{motor} \quad (7)$$

onde:

$\eta_{elevação}$: eficiência da elevação

$\eta_{mecânica}$: eficiência mecânica para os componentes de superfície

η_{motor} : eficiência geral do motor elétrico

Com estas definições, pode-se dizer que para minimizar a potência de entrada é necessária maximizar a eficiência do sistema, que é definida por uma fórmula de três termos (equação 7). Logo, a investigação de cada um deles permite tirar conclusões importantes sobre as possíveis maneiras de atingir a máxima eficiência energética em operações de bombeio de haste (TAKACS, 2010).

Os valores médios da eficiência mecânica da superfície são altos, geralmente acima de 90% em condições favoráveis. No que diz respeito à eficiência do motor, os valores reais pertencem a faixas de 30% e 80%, devido à carga cíclica do motor durante o bombeio. Esses valores podem ser maximizados com a seleção correta do tamanho do motor elétrico. A unidade de bombeio mantida com uma caixa de engrenagens operada perto de sua capacidade de torque garante uma eficiência mecânica superior a 90%. Assim, a eficiência combinada (mecânica e motor) pode situar-se na faixa de 67% a 88% (TAKACS, 2010).

O único termo que permite um maior número de modificações é a eficiência de elevação. Assim, a velocidade da unidade de bombeio, o tamanho do êmbolo e o comprimento do curso da haste polida podem ser alterados com o intuito de obter uma maior produtividade (BASTOS, 2017).

Em resumo, o requisito básico para alcançar altas eficiências gerais do sistema é encontrar o valor máximo possível da eficiência de elevação (TAKACS, 2010).

Considerando-se as condições ideais de contrapeso, alguns benefícios podem ser alcançados, tais como: redução do tamanho da caixa de velocidades em relação a uma condição desequilibrada; redução do tamanho do motor elétrico; baixo custo de manutenção e aumento do tempo de vida útil do equipamento. Uma maneira fácil de verificar se a unidade está equilibrada consiste em medir a corrente

do motor por ciclo. Para isto, a corrente versus posição da haste polida por ser obtida. Se o valor de pico no curso ascendente é o mesmo que o valor de pico no curso descendente, a unidade está equilibrada. Esta visão geral é importante para entender como o contrapeso é indispensável para o funcionamento do sistema (BASTOS, 2017).

3. MATERIAL E MÉTODO

Esta pesquisa tem uma abordagem exploratório-descritiva. Segundo Gil (2010), a pesquisa exploratória tem como objetivo proporcionar maior familiaridade com o problema, para torná-lo mais explícito ou para construir hipóteses.

Neste artigo foi feita uma revisão bibliográfica sobre o funcionamento básico do sistema de bombeio mecânico de hastes em poços de petróleo assim como os principais custos envolvidos durante a produção com esse sistema e o seu respectivo balanço energético. Para isso, utilizou-se como método de pesquisa a técnica de bibliometria, com buscas nos principais banco de pesquisa, como o Periódico Capes, Scopus e Elsevier.

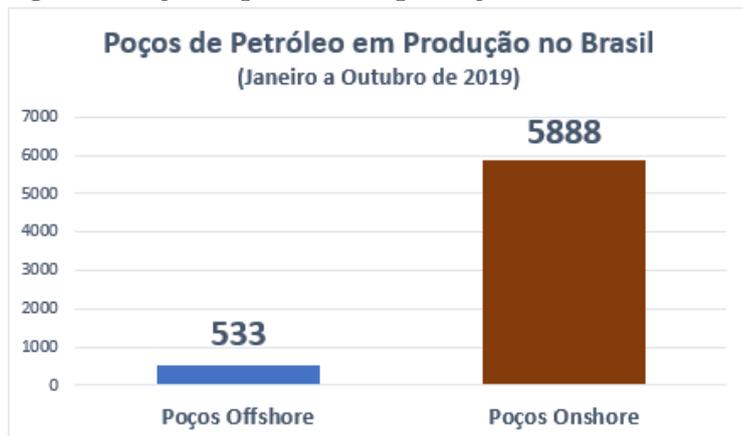
Em seguida, prosseguiu-se com uma abordagem quantitativa a fim de levantar os dados de utilização deste método de elevação artificial no Brasil por meio de análises de bancos de dados da ANP.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foi solicitado, via Sistema Eletrônico do Serviço de Informações ao Cidadão (e-SIC), que permite qualquer pessoa, física ou jurídica, encaminhar pedidos de acesso à informação, acompanhar o prazo e receber a resposta da solicitação realizada para órgãos e entidades do Executivo Federal, dados sobre os poços *onshore* no Brasil que utilizaram, como método de elevação artificial o bombeio mecânico de hastes no ano de 2019.

Os dados aqui descritos correspondem aos poços com status “produzindo”, de janeiro a meados de outubro de 2019.

Figura 9. Poços de petróleo em produção no Brasil em 2019



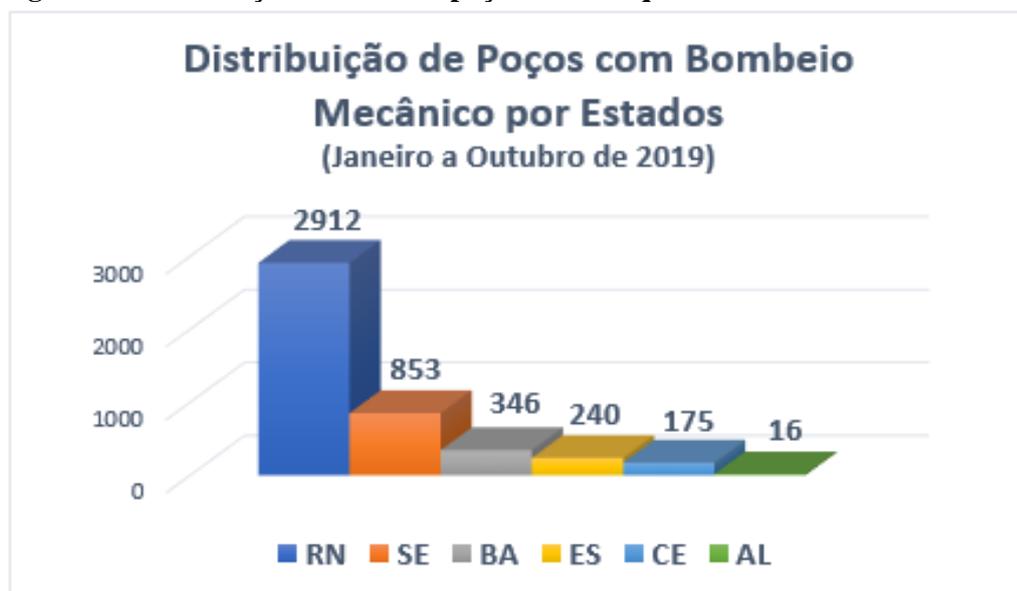
Fonte: e-SIC, 2019. Elaboração dos autores.

De todos os poços em produção no país, cerca de 5888 eram poços *onshore*.

Desses, cerca de 77% utilizaram o bombeio mecânico por hastes, como mostrado no início desse artigo na figura 2, confirmando a grande porcentagem de poços que utilizam este método de elevação artificial.

Métodos de elevação artificial, como o BCS (Bombeio Centrífugo Submerso), BCP (Bombeio por Cavidades Progressivas), GLI (Gás *Lift* Intermitente), dentre outros, são responsáveis pela operação de apenas 23% dos poços *onshore*. Isso mostra o grande destaque que o método de elevação artificial de bombeio mecânico de hastes tem no Brasil. Por esta razão, o objetivo do estudo desse artigo tem um grande potencial de aplicação e mostrando-se viável, contribuirá para o reaproveitamento de energia elétrica nas regiões onde se utilizam esse método.

Figura 10. Distribuição estadual de poços onshore que utilizam o bombeio mecânico



Fonte: e-SIC, 2019. Elaboração dos autores.

O gráfico representado na figura 10 mostra os seis estados brasileiros que em 2019 utilizaram o bombeio mecânico de hastes em seus poços. É possível notar a predominância do uso desse método no estado do Rio Grande do Norte. Em seguida, estão os estados de Sergipe, Bahia, Espírito Santo, Ceará e finalmente, Alagoas.

5. CONCLUSÃO

Pesquisas sobre a extração da energia de ondas e sua conversão em energia elétrica são recentes e ainda estão em desenvolvimento. Muitas ideias de aplicação estão surgindo e uma delas, apresentada por esse artigo, é acoplar um gerador linear ao equipamento de elevação artificial de petróleo conhecido como bombeio mecânico de hastes, para que, por meio do movimento vertical natural das hastes do equipamento seja possível acionar um gerador linear que transforme o movimento alternativo em energia elétrica.

O estudo estatístico da quantidade representativa de poços *onshore* em 2019 revelou que cerca 77% dos poços utilizam esse antigo método, mostrando o grande potencial de aplicação caso seja possível. O maior impacto seria no estado do Rio Grande do Norte, que possui 64% dos poços em todo o território brasileiro.

Considerando este potencial, nota-se a oportunidade de analisar se o projeto é viável ou não, especialmente no Nordeste do país.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALIEV, T.A.; RZAYEV, A.H.; GULUYEV, G.A.; ALIZADA, T.A.; RZAYEVA, N.E. **Robust technology and system for management of sucker rod pumping units in oil wells**. Mechanical Systems and Signal Processing, 99, p.47-56, 2018.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO - ANP, 2019. **Anuário Estatístico 2019**. URL: (<http://www.anp.gov.br/carregamento-comercializacao-autoprodutor-autoimportador-consumo-em-refinarias-e-fafens/2-uncategorised/5258-anuario-estatistico-2019-dados-abertos>) (Acesso em 28 de abril de 2020).

AROF, H.; EID, A.M.; NOR, K.M. **On the issues of starting and cogging force reduction of a tubular permanente magnet linear generator**. Australasian Universities Power Engineering Conference, AUPEC, 2004.

BASTOS, I.C. **Eficiência Energética em Sistemas de Elevação Artificial – Bombeio Mecânico**. HOLOS, [S.l.], v. 1, p. 255-263, jul. 2017. ISSN 1807-1600. Disponível em: <<http://www2.ifrn.edu.br/ojs/index.php/HOLOS/article/view/5194>>. Acesso em: 19 out. 2019. doi:<https://doi.org/10.15628/holos.2017.5194>.

CUNHA, I. P.; MOREIRA, M.A.C.; SANTOS, R.C.; SANTOS, J.A.M. **Estudo da Viabilidade de Utilização de uma Máquina de Fluxo Transversal Linear como parte da Estrutura do Conversor de Energia das Ondas Point Absorber**. Revista Vértices, Campos dos Goytacazes, v.9, n.2, 2017.

DREW, B.; PLUMEER, A.R.; SAHINKAYA, M.N. **A review of wave energy converter technology**. Journal of Power and Energy, Bath-UK, vol. 223, 2009.

EIA, 2019. **Renewable energy explained**. URL: <<https://www.eia.gov/energyexplained/renewable-sources/renewableenergy/>> (Acesso em 5 de outubro de 2019)

e-SIC, 2019. **Sistema Eletrônico do Serviço de Informação ao Cidadão**. URL: (<https://esic.cgu.gov.br/sistema/site/index.aspx>) (Acesso em 7 de novembro de 2019).

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, vol, n.8, aug, p.2177, 2018.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 5. ed. São Paulo: Atlas, 2010.

HARJANNE, A.; KORHONEN, J.M. **Abandoning the concept of renewable energy**. Energy Policy, 127, p.330-340, 2019.

LEJERSKOG, E.; BOSTREOM, C.; HAI, L.; WATERS, R.; LEIJON, M. **Experimental results on power absorption from a wave energy converter at the Lysekil wave energy research site**. Renewable Energy, 77, p. 9-14, 2014.

MARTINS, E.; MARCILIO, W.; MOREIRA, M.; SANTOS, J. **Development of Linear Generator Prototype As Part of A Point Absorber Wave Energy Converter**. IEEE 15th Brazilian Power Electronics Conference and 5th IEEE Southern Power Electronics Conference (COBEP/SPEC), Santos, Brazil, pp. 1-5, 2019.

NASCIMENTO, J.M.A. **Simulador Computacional para Poços de Petróleo com Método de Elevação Artificial por Bombeio Mecânico**. 2005. 113f. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2005.

NOAD IF.; PORTER R. **Modelling an articulated raft wave energy converter**. Renewable Energy, 114, p.146-159, 2017.

PISCOPO, V.; BENASSAI, G.; COZZOLINO, L.; DELLA MORTE, R.; SCAMARDELLA, A. **A new optimization procedure of heaving point absorber hydrodynamic performances.** Ocean Engineering, 116, p.242-259, 2016.

RAMÍREZ, J.; ABRIL, W.; VARGAS, L.; TRIVINO, C. **Saving Energy in Heavy-Oil Fields in Colombia with Progressive Cavity Pumps.** Paper SPE 108083, 2007.

ROSA-SANTOS, P.; TAVEIRA-PINTO, F.; RODRIGUES, C. A.; RAMOS, V.; LÓPEZ, M. **The CECO wave energy converter: Recent developments.** Renewable Energy, 139, p.368-384, 2019.

SERGIENKO, N.Y.; CAZZOLATO, B.S.; DING, B., HARDY, P.; ARJOMANDI, M. **Performance comparison of the floating and fully submerged quasipoint absorber wave energy converters.** Renewable Energy, 108, p.425-437, 2017.

TAKACS, G. **Sucker-rod pumping manual.** Oklahoma: Penn Well Corporation, 2002.

TAKACS, G. **Ways to Obtain Optimum Power Efficiency of Artificial Lift Installations.** 2010. SPE Oil and Gas India Conference and Exhibition. doi:10.2118/126544-ms <https://www.onepetro.org/conference-paper/SPE-183722-MS> (Acesso em 26 de outubro de 2019).

THOMAS, J.E. **Fundamentos de Engenharia de Petróleo.** Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2001.

WANG, L.; KOLIOS, A., CUI, L.; SHENG, Q. **Flexible multibody dynamics modelling of point-absorber wave energy converters.** Renewable Energy, 127, p.790-801, 2018.

WANG, S.; ROWLAN, L.; ELSHARAFI, M.; ERMILA, M. A.; GREJTAK, T.; TAYLOR, C. A. **On Leakage Issues of Sucker Rod Pumping Systems.** Journal of Fluids Engineering, 141, 2019.

YU, T.; SHI, H.; SONG, W. **Rotational characteristics and capture efficiency of a variable guide vane wave energy converter.** Renewable Energy, 122, p.275-290, 2018.

ARTIGO CIENTÍFICO 2

MÉTODOS ALTERNATIVOS PARA OTIMIZAÇÃO E REAPROVEITAMENTO ENERGÉTICO EM SISTEMAS DE BOMBEIO MECÂNICO DE HASTES NA INDÚSTRIA DE PETRÓLEO: UM ESTUDO BIBLIOMÉTRICO

ALTERNATIVE METHODS FOR ENERGY OPTIMIZATION AND REUSE IN ROD PUMPING SYSTEMS IN THE OIL INDUSTRY: A BIBLIOMETRIC STUDY

Leandro Ferreira de Souza - IFFluminense/PPEA

Marcos Antonio Cruz Moreira - IFFluminense/PPEA

Eduardo Beline da Silva Martins - IFFluminense

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

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.*

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 (MIHELISIC *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).

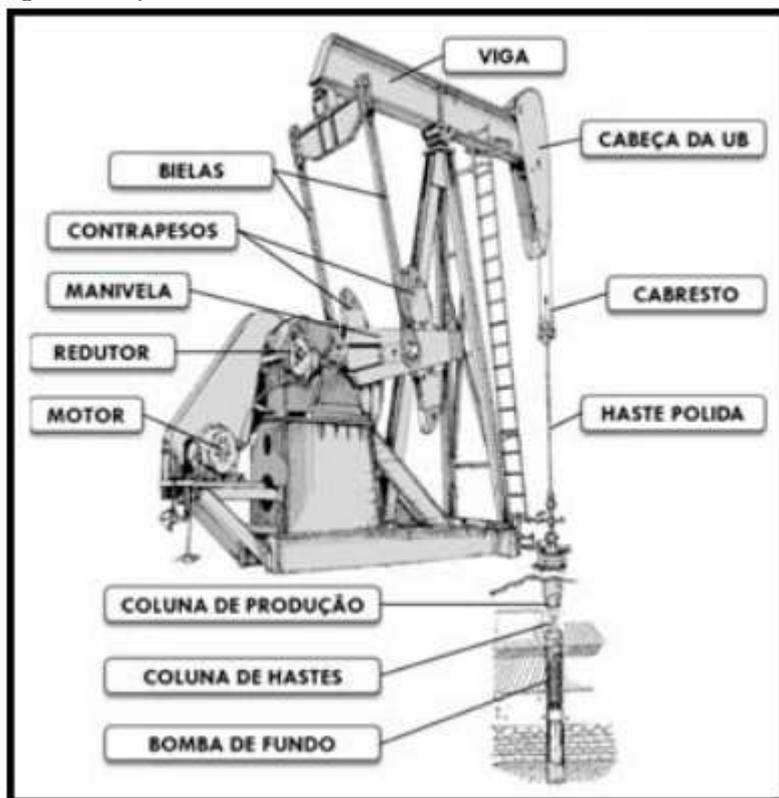
O petróleo é uma das fontes tradicionais de energia mais importantes do mundo, desempenhando um papel relevante na vida moderna. No entanto, o processo de extração de petróleo consome muita energia elétrica e aumenta os custos de produção (ZHANG *et al.*, 2020).

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.

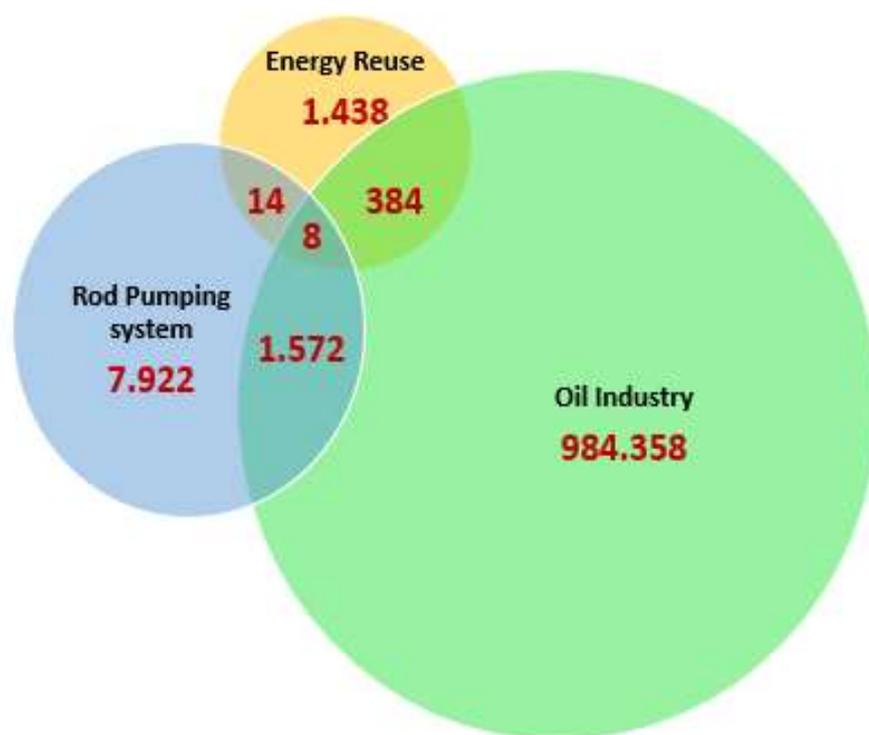
Depois disso, utilizou-se a ferramenta Biblioshiny®, baseada no ambiente de programação R-Studio®, com o objetivo de realizar uma análise mais detalhada dos artigos.

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



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

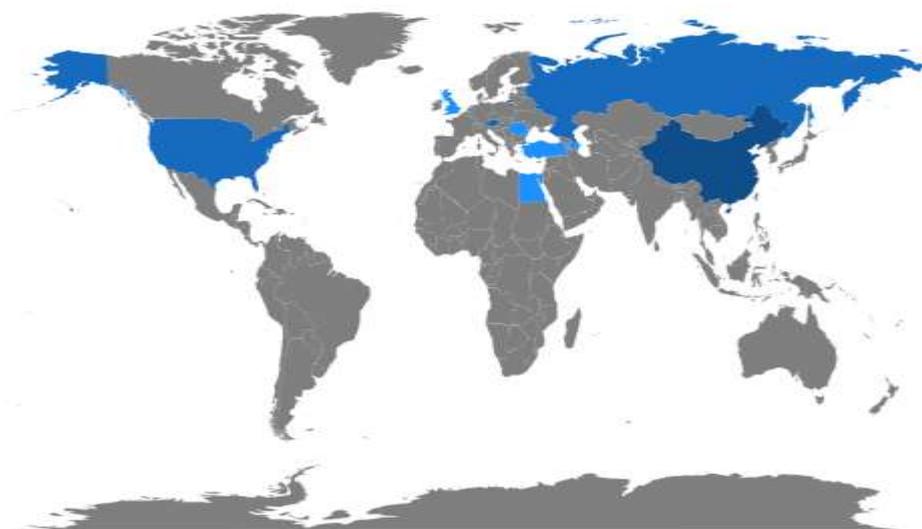


Fonte: Autores (2021)

Aqui é possível notar como as palavras *model*, *optimization* e *simulation* se relacionam numa frequência maior, indicando um escopo de estudo diferente do que é proposto neste artigo.

A Figura 4 mostra, na cor azul, onde está, atualmente, a concentração de artigos publicados envolvendo essas palavras-chave, com destaque para a China.

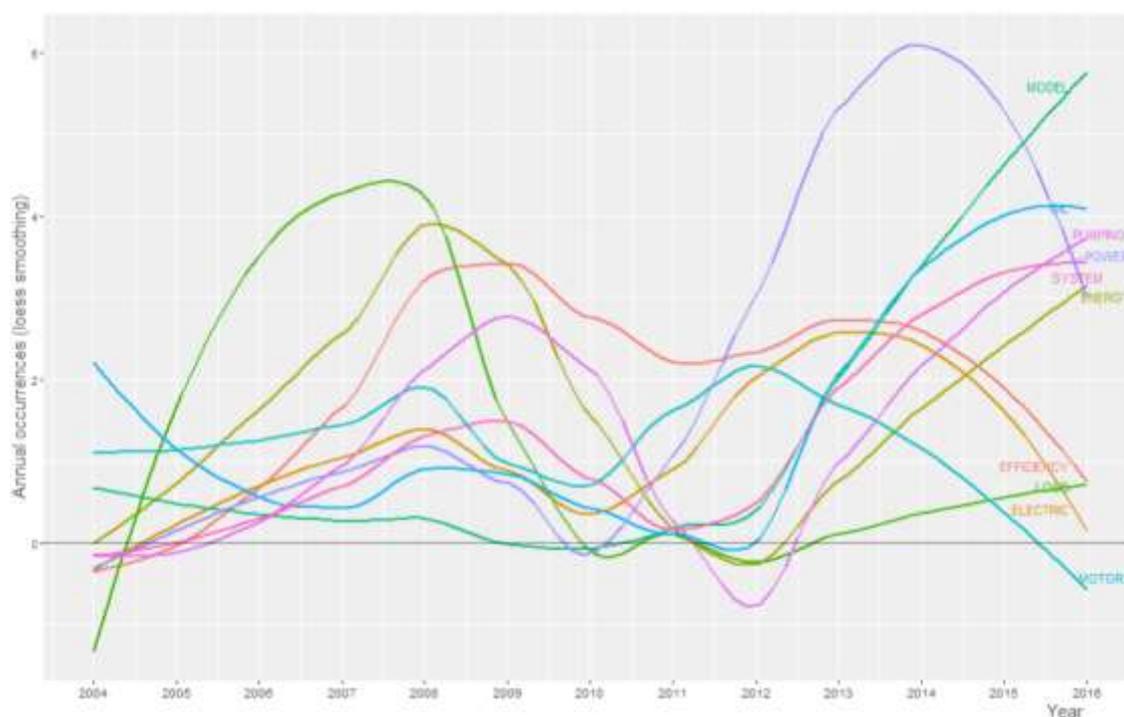
Figura 4: Distribuição da produção científica por países relacionada às palavras chave



Fonte: Autores (2021)

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

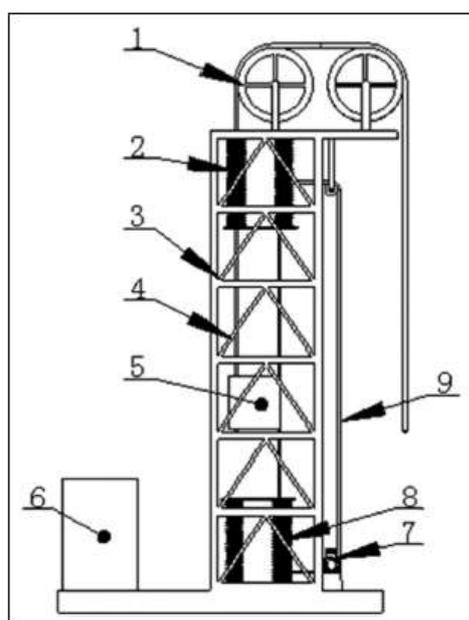
PATENTE	TÍTULO
1	Unidade de bombeio eólica. Depositante: Petróleo Brasileiro S/A - Petrobrás. Procurador: Seldon Parkes. BR nº PI 9911533-6 B1
2	Unidade de bombeio para extração de petróleo dotado de contrapeso dinâmico alimentado por energia solar ou eólica. Depositante: Omar Pereira Gurgel. Procurador: Vilage Marcas e Patentes LTDA. BR nº 102013014012 – A2

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) propõem 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.

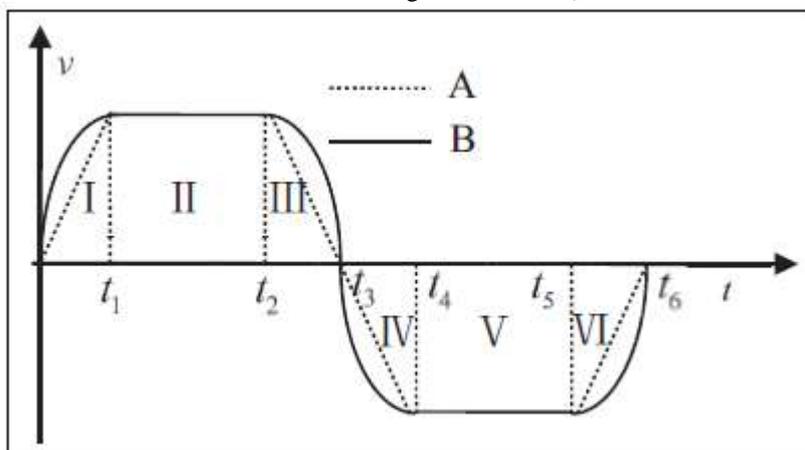
Para esta proposta, o diagrama esquemático do sistema é apresentado na Figura 6.

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).

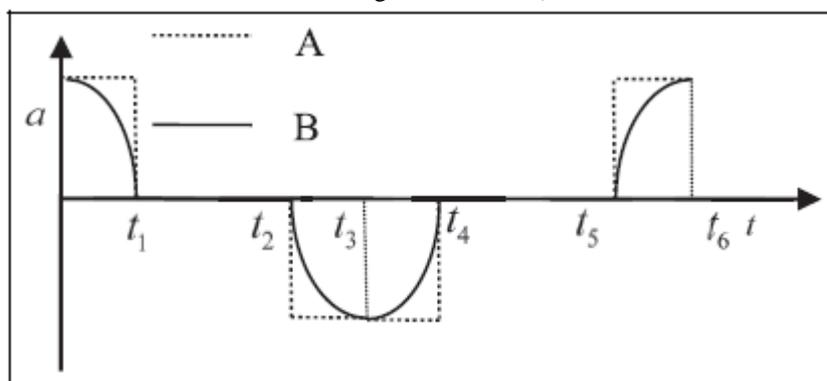


Fonte: MENG *et al.*, 2017

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 conseqüentemente, 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) propõem 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) propõem, 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.

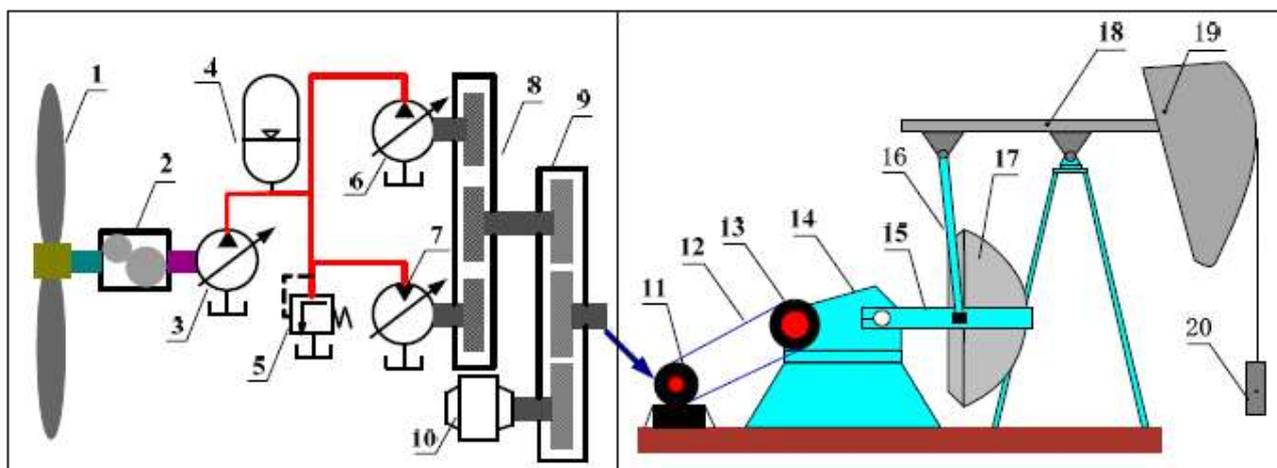
Esta estrutura de transmissão híbrida é de grande importância, pois abre novas possibilidades para o uso de energia eólica em campos de petróleo. Além disso, os campos de petróleo em áreas remotas enfrentam problemas com a falta de eletricidade e costumam ser ricas em recursos eólicos. Grandes turbinas 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.

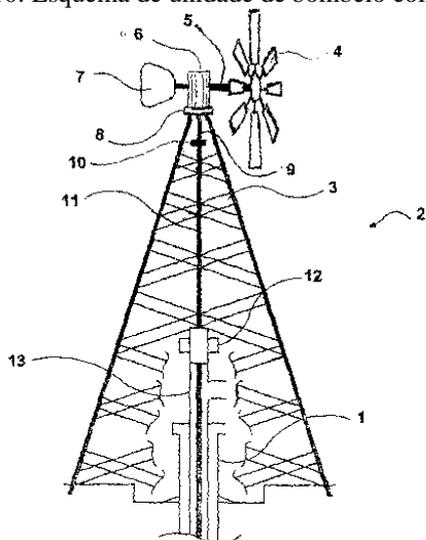
Há estudos, como o de PINHEIRO *et al.*, (2012), que visam substituir o método de alimentação convencional das unidades de bombeio mecânico por fontes alternativas de energia, como a energia eólica. Embora haja relatos de que algumas unidades da Petrobras do Rio Grande do Norte e Ceará já utilizem esses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

Nessa linha, existem alguns trabalhos publicados que propõem 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

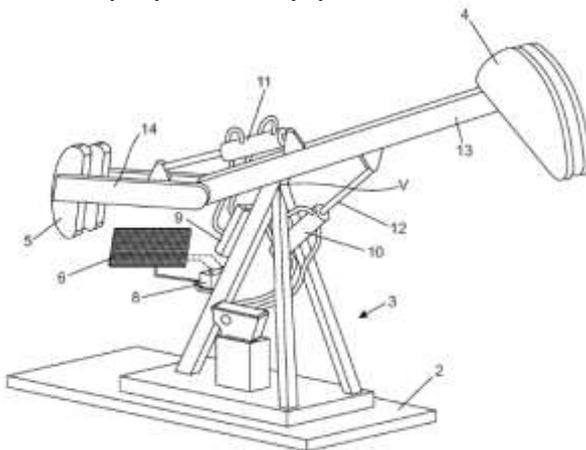


Fonte: COSTA (2006)

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

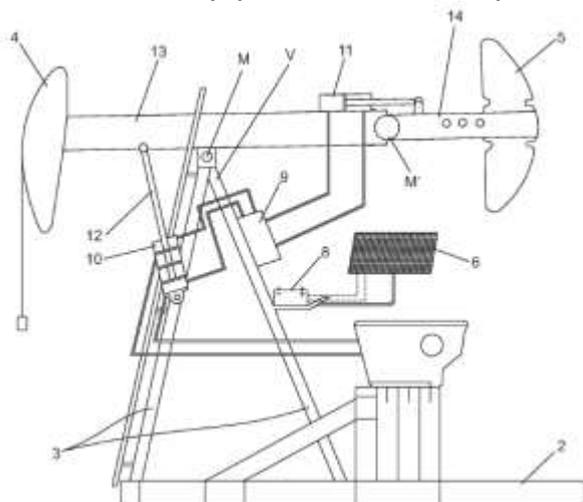


Fonte: GURGEL (2014)

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.

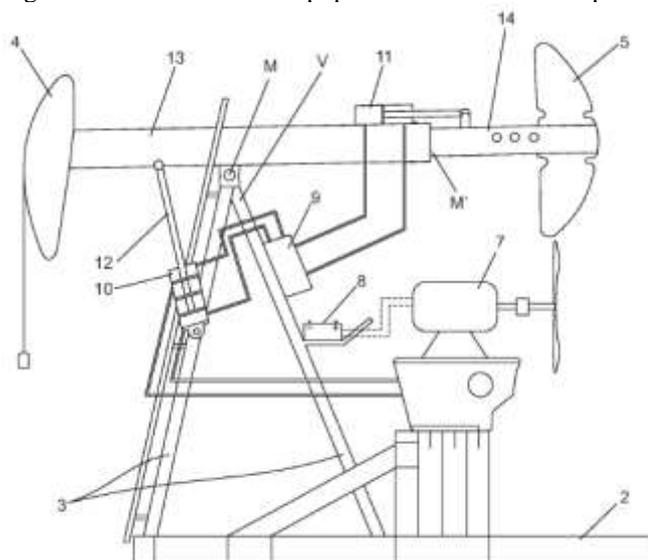
Ainda na estrutura piramidal é inserida uma placa solar (6), conforme mostra a Figura 12, ou eólica (7), conforme se observa na Figura 13, que mantém recarregada a bateria (8), cuja função é alimentar uma caixa de comando hidráulico (9), que por meio de ajuste manual ou por meio de software, faz o sincronismo 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.

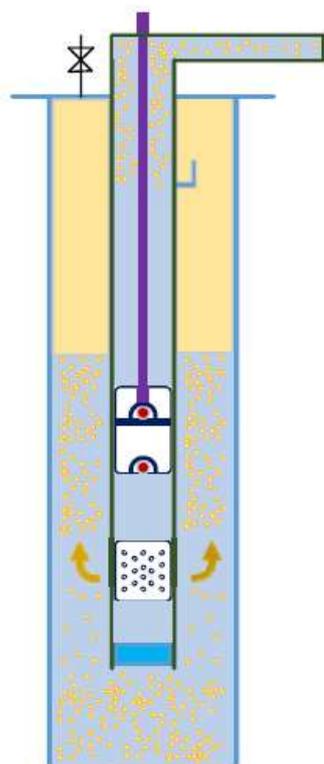
Depois de levar isso em consideração, esses colaboradores passaram a usar o método de

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 Biblmetrix® 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.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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.

CONCLUSÃO

A proposta inicial dessa dissertação foi estudar formas de economia na indústria de produção de petróleo onshore e mais especificamente, investigar, de forma inovadora, o que está sendo discutido sobre a otimização e a reutilização energética em sistemas de bombeio com hastes para propor o uso de gerador linear nas hastes do equipamento de bombeio mecânico.

O estudo não foi conclusivo no que diz respeito à viabilidade desse projeto.

Como o movimento das hastes no equipamento de bombeio mecânico é vertical, pode-se supor que há uma semelhança com o movimento das ondas. Logo, propor a utilização de um gerador linear acoplado ao sistema para obter energia a partir do movimento das hastes, seria uma solução empreendedora.

Apesar de existir uma tendência para definir geradores lineares síncronos de ímãs permanentes como os mais adequados para extração de energia das ondas oceânicas, pela densidade de potência que essa máquina tem e melhor fator de potência, não existem ainda propostas de máquinas para o uso como reaproveitamento de energia junto ao bombeamento por hastes.

No Brasil são utilizadas unidades de bombeio do tipo Convencional, isto é, Classe I, com geometria descrita nos anexos da Norma API SPEC 11E. Os principais fornecedores que atendem operadoras na América do Sul e ao Brasil são a Lufkin, líder da indústria com mais de 100 anos de experiência, tendo fábrica instalada na Argentina; Weatherford, com fábricas nos Estados Unidos e na China. No Brasil, a fresadora Santana, com sede em São Paulo, tem o *know how* para fabricar as Unidades de Bombeio, mas não tem uma linha de produção instalada por não haver demanda para tal. Na China há outros fornecedores, porém de qualidade inferior aos líderes da indústria.

É verdade que há potencial de aplicação no território brasileiro, principalmente nos poços *onshore* do Nordeste, porém seria necessária uma análise mais detalhada, que vai desde a fabricação de um protótipo até o teste *in loco*, o que ficou impossibilitado de ser feito por conta da pandemia do COVID-19, que coincidiu com o período desta pesquisa.

Pensando no funcionamento do equipamento de bombeio de hastes, pode-se dizer que um grande desafio desta proposição é o local de instalação do gerador linear. Levando-se em conta a fragilidade estrutural dos ímãs, dependendo do lugar onde este gerador for instalado, haveria mais riscos de danos estruturais nos ímãs, comprometendo a produção de energia. O peso do transdutor também deve ser motivo de análise pois pode contribuir com o aumento de perda de carga no equipamento. É importante também lembrar da interação desse tipo de gerador linear com o equipamento de bombeio mecânico de hastes, já que a força denominada “*cogging force*” atua provocando resistência ao movimento de translação do translador e conseqüentemente, favorece a

retenção ao movimento, podendo causar vibrações e ruído.

Conforme a tecnologia de geração de energia se desenvolve, muitos tipos de geradores lineares têm despertado ampla atenção e discussão. Conhecer o que esses autores têm proposto poderá auxiliar em inspirações para aplicações no projeto atual, principalmente na escolha do melhor tipo de gerador linear a ser testado.

Trabalhos futuros devem focar em experimentos e simulações para validar esta proposta teórica.

Após definir uma linha de estudo para criação de um protótipo para teste, seria interessante analisá-lo por meio do método de elemento finito.

Uma análise mais aprofundada deve ser conduzida para se chegar num design de protótipo. O protótipo fabricado pode ser usado para conduzir testes experimentais em laboratório e validar os resultados da simulação e computação.

Adicionalmente, a montagem completa do projeto do gerador linear deve ser deliberada, de modo que todo o sistema possa ser testado em um equipamento in loco.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS DA DISSERTAÇÃO

CLEMENT, A., CULLEN, P., FALCÃO, A., FIORENTINO, A., GARDNER, F., HAMMARLUND, K., LEMONIS, G., LEWIS, T., NIELSEN, K., PETRONCINI, S., PONTES, M., SCHILD, P., SJOSTROM, B., SORENSEN, H., THORPE, T. Wave energy in Europe: current status and Perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 6 (2002) 405–431

CORDOVIL, P.T.C. O Gerador Linear de Magnetos Permanentes Aplicado à Recuperação de Energia das Ondas. Dissertação de Mestrado – Instituto Superior Técnico Universidade de Lisboa, 2013.

COSTA, R., KARBAGE, E. Bombeio Mecânico: projeto, operação e manutenção, 2020. Editora Independently Published.

CUNHA, I. P.; MOREIRA, M.A.C.; SANTOS, R.C.; SANTOS, J.A.M. Estudo da Viabilidade de Utilização de uma Máquina de Fluxo Transversal Linear como parte da Estrutura do Conversor de Energia das Ondas Point Absorber. *Revista Vértices, Campos dos Goytacazes*, v.9, n.2, 2017.

GAO, Y., SHAO, S., ZOU, H., TANG, M., XU, H., TIAN, C. A fully floating system for a wave energy converter with direct-driven linear generator. *Energy* 95 (2016) 99-109.

GUODONG, Q., QUANRU, P., ZHONGXIAN, C. A Wave Energy Extraction System in Experimental Flume. *International Journal of Rotating Machinery*, 2016, Article ID 2573174, 4 pages.

HUANG, L., LIU, J., YU, H., QU, R., CHEN, H., FANG, H. Winding Configuration and Performance Investigations of a Tubular Superconducting Flux-Switching Linear Generator. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 25(3), 1–5, 2015.

JING, Z., HAITAO, Y., ZHENCHUAN, S. (2019). Analysis of a PM Linear Generator with Double Translators for Complementary Energy Generation Platform. *Energies*, 12(24), 4606–. doi:10.3390/en12244606

LEJERSKOG, E.; BOSTREOM, C.; HAI, L.; WATERS, R.; LEIJON, M. Experimental results on power absorption from a wave energy converter at the Lysekil wave energy research site. *Renewable Energy*, 77, p.9-14, 2014.

LIU, C., CHEN, R., ZHANG, Y., WANG, L., QIN, J. A novel single-body system for direct-drive wave energy converter. *International Journal of Energy Research* Volume 45, Issue 5 p. 7057-7069, 2020.

LIU, Z., ZHANG, R., XIAO, H., WNAG, X. Survey of the mechanisms of power take-off (PTO) devices of wave energy converters. *Acta Mechanica Sinica*, 2020.

YU, T.; SHI, H.; SONG, W. Rotational characteristics and capture efficiency of a variable guide vane wave energy converter. *Renewable Energy*, 122, p.275-290, 2018.