



UNIVERSIDADE FEDERAL DO OESTE DA BAHIA
CENTRO DAS CIÊNCIAS EXATAS E DAS TECNOLOGIAS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

ANNA FLÁVIA MARQUES GUEDES

BOMBA ESPIRAL DE BAIXO CUSTO PARA RECALQUE DE
ÁGUA

BARREIRAS, BA
JULHO DE 2022

ANNA FLÁVIA MARQUES GUEDES

**BOMBA ESPIRAL DE BAIXO CUSTO PARA RECALQUE DE
ÁGUA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Oeste da Bahia como requisito parcial à obtenção do grau de Engenheira Civil.

Orientador: Prof. D.Sc. Luís Gustavo Henriques do Amaral

BARREIRAS, BA

JULHO DE 2022

FICHA CATALOGRÁFICA

G924 Guedes, Anna Flávia Marques.

Bomba espiral de baixo custo para recalque de água / Anna Flávia Marques Guedes. – 2022.

56f.

Orientador: Prof. D.Sc. Luís Gustavo Henriques do Amaral.
Monografia (Graduação) – Bacharelado em Engenharia Civil. Universidade Federal do Oeste da Bahia. Centro das Ciências Exatas e das Tecnologias. Barreiras, BA, 2022.

1. Roda d'água flutuante. 2. Recalque de água. 3. Bomba de bobina. I. Amaral, Luís Gustavo Henriques do. II. Universidade Federal do Oeste da Bahia - Centro das Ciências Exatas e das Tecnologias. III. Título.

CDD 624

Biblioteca Universitária de Barreiras - UFOB

ANNA FLÁVIA MARQUES GUEDES

**BOMBA ESPIRAL DE BAIXO CUSTO PARA RECALQUE DE
ÁGUA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Oeste da Bahia como requisito parcial à obtenção do grau de Engenharia Civil.

Aprovada em 18 de julho de 2022

Banca Examinadora

Orientador:

D.Sc. Luís Gustavo Henriques do Amaral
Universidade Federal do Oeste da Bahia

M.Sc. Weriskiney Araújo Almeida
Universidade Federal do Oeste da Bahia

D. Sc. Wanderley de Jesus Souza
Universidade Federal do Sul da Bahia

A minha saudosa avó Walkiria, que sempre foi minha maior incentivadora, dedico este trabalho.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por me conceder a vida e por me proporcionar força e determinação nos muitos momentos difíceis que pensei em desistir.

A minha saudosa avó Walkiria por ser meu ponto de apoio maior, minha incentivadora, meu espelho e meu grande e eterno amor.

Aos meus pais, Frondizi e Walkirene, por nunca medirem esforços em me proporcionar sempre o melhor estudo, o melhor lar e a melhor família.

Aos meus irmãos, Higgor e Nanda, por entenderem os meus estresses diários e acreditarem muito no meu potencial.

A Patrick, por todo amor e companheirismo, sempre presente acreditando demasiadamente em minha capacidade e ajudando em todas as etapas de construção, instalação e teste da bomba.

A Clauberto pelo auxílio durante o transporte, instalação e teste da bomba espiral.

Ao professor Dennis, pela disponibilidade e boa vontade em contribuir com os desenhos da bomba.

Aos meus colegas e amigos de dentro e fora da UFOB, que não me atrevo a citar por medo de esquecer algum. Vocês são fundamentais em todas as etapas de minha vida.

Ao meu professor orientador Luís Gustavo, por todo o suporte, toda a preocupação, a disponibilidade, a paciência e contribuição para construção e desenvolvimento deste trabalho. Por sempre acreditar que daria certo, me incentivar e agir com todo amor e profissionalismo. Agradeço também a esposa do Luís Gustavo, por todo apoio, todos os almoços e lanches proporcionados durante a confecção da bomba.

Aos professores Weriskiney e Wanderley que fizeram parte da banca avaliadora.

Ao Centro das Ciências Exatas e das Tecnologias (CCET) da Universidade Federal do Oeste da Bahia (UFOB), por ter proporcionado condições de desenvolver este trabalho.

A todos que contribuíram de alguma forma para a conclusão desta etapa, minha eterna gratidão.

RESUMO

Frente à falta de alternativas de baixo custo para bombeamento de água os produtores rurais se veem obrigados a investir em opções de bombeamento de alto custo e que demandam grande quantidade de energia para o seu acionamento. No entanto, em alguns locais a indisponibilidade de energia elétrica, associada aos altos custos de manutenção dos sistemas industriais, inviabilizam o uso de sistemas de bombeamento para os pequenos proprietários rurais. Assim, a utilização de rodas d'água surge como uma alternativa de baixo custo que pode ser utilizada em regiões ribeirinhas. Logo, esse estudo teve como objetivo geral desenvolver uma bomba de bobina espiral de baixo custo para recalque de água em cursos d'água com baixa velocidade de escoamento. Foi então desenvolvida uma bomba espiral acoplada a uma roda d'água de corrente flutuante, a partir de parâmetros de projeto e recomendações presentes na literatura. Os custos de materiais e mão de obra para fabricação do equipamento foram estimados com base nos preços comerciais e serviços locais e especializados. O desempenho do equipamento foi analisado por meio de observação do seu funcionamento por sete meses ininterruptos, bem como por meio da medição de parâmetros como vazão fornecida, altura geométrica total e velocidade de rotação. Por fim, constatou-se que a bomba apresenta um bom funcionamento, pouca necessidade de manutenção e custo acessível, da ordem de R\$ 2.423,34 (US\$ 435,85). A vazão fornecida foi de aproximadamente 3.600 L dia⁻¹ a uma velocidade de rotação de 5 rpm, atingindo uma altura geométrica de 9,6 m. No entanto, demanda-se pela realização de mais testes para compreender melhor o funcionamento da bomba quando submetida a diferentes velocidades de rotação e alturas geométricas.

Palavras-chave: roda d'água flutuante, recalque de água, bomba de bobina

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	08
2 OBJETIVOS	11
2.1. OBJETIVO GERAL	11
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	11
3 REVISÃO DE LITERATURA.....	12
3.1 MÁQUINAS DE FLUIDO	12
3.2 MÁQUINAS DE FLUXO.....	13
3.2.1 Rodas d'água	14
3.3 MÁQUINAS DE DESLOCAMENTO POSITIVO.....	16
3.3.1 Bombas de bobina.....	17
3.3.2 Aspectos relativos ao dimensionamento de bombas de bobina espirais.....	22
4 MATERIAL E MÉTODOS	28
4.1 CONCEPÇÃO, FABRICAÇÃO E INSTALAÇÃO DA BOMBA ESPIRAL	28
4.1.1 Dimensionamento da bomba espiral.....	28
4.1.2 Dimensionamento da roda d'água	29
4.1.3 Fabricação e montagem do equipamento.....	32
4.2 QUANTIFICAÇÃO DOS CUSTOS DE CONSTRUÇÃO DA BOMBA ESPIRAL	37
4.3 AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DA BOMBA ESPIRAL.....	38
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	41
5.1 EQUIPAMENTO DESENVOLVIDO	41
5.2 CUSTO DE CONSTRUÇÃO DA BOMBA ESPIRAL	43
5.3 AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DA BOMBA ESPIRAL.....	46
6 CONCLUSÕES.....	53
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	54

1 INTRODUÇÃO

O acesso à água sempre foi uma necessidade primordial para o desenvolvimento de qualquer comunidade. Um dos principais usos da água é a irrigação, que apresenta diversos benefícios, tais como o aumento da área cultivada, a melhoria do rendimento das colheitas, a redução do risco de seca e a maior segurança econômica para o produtor (FRAENKEL, 1986). Desde os tempos mais remotos o homem busca o controle da natureza e seus elementos. O homem primitivo transportava água em baldes ou conchas; no entanto, com a composição de maiores grupos, esse processo passou a ser mecanizado (BRASIL, 2006).

De acordo com Fraenkel (1986), a irrigação em pequena escala auxilia na redução da pobreza, aumentando a renda dos agricultores e dos trabalhadores envolvidos na produção. Além disso, nas pequenas propriedades rurais, a irrigação pode aumentar os rendimentos dos cultivos de forma mais significativa do que em grandes propriedades.

Devido à falta de alternativas, os produtores rurais por vezes são obrigados a investirem em opções de bombeamento de alto custo e que demandam grande quantidade de energia para o seu acionamento (DAL BEM *et al.*, 2016). Por outro lado, Alvarenga *et al.* (2014) afirmam que o aumento da demanda energética em decorrência dos atuais padrões de consumo e a possível escassez na oferta de combustíveis fósseis está levando ao desenvolvimento de novas tecnologias para aperfeiçoar a utilização de fontes energéticas que minimizem os impactos ambientais.

No passado, as rodas d'água eram consideradas fontes de energia mecânica eficientes e comercialmente interessantes, geralmente empregadas para acionamento de moinhos, máquinas têxteis e bombas d'água em pequenos empreendimentos. Com o advento do motor elétrico, nas décadas de 1940 e 1950, as rodas d'água caíram em desuso. Entretanto, com o crescimento da demanda por fontes de energia renovável, as rodas d'água passaram a ser novamente consideradas, consistindo em opções de melhor custo-benefício do que as turbinas quando as cargas hidráulicas e as vazões disponíveis são baixas (MÜLLER & KAUPPERT, 2004).

Em locais próximos a cursos d'água, a utilização de rodas d'água para a conversão da energia hidráulica do escoamento em energia mecânica para acionamento de bombas hidráulicas pode representar uma opção viável. De acordo com Quaranta (2018), a associação da roda d'água com uma bomba de bobina espiral é uma boa

alternativa para o bombeamento de água em pequenas propriedades. Essa bomba consiste num tubo enrolado ao redor do eixo da roda d'água, formando uma espiral por onde a água escoar. A água é coletada na extremidade do tubo situada na parte externa da espiral e flui pelo tubo, sendo conduzida para o interior do eixo da roda e, em seguida, para uma tubulação conectada a esse eixo.

Essencialmente, a bomba espiral contém uma tubulação enrolada em forma de bobina que gira em torno do eixo horizontal. Uma das extremidades da tubulação é aberta e mergulha na água uma vez por revolução, recolhendo volumes de água e ar alternadamente. As colunas de água e ar se movem progressivamente ao longo da tubulação à medida que a bomba gira, e a rotação da espiral produz um diferencial de pressão capaz de bombear a água (FRAENKEL, 1986; QUIROGA *et al.*, 2019).

A bomba espiral pode ser uma solução de bombeamento sustentável e de baixo custo para pequenas propriedades rurais. Apesar de a bomba espiral ter sido objeto de diversos trabalhos técnicos e científicos (MORTIMER e ANNABLE, 1984; TAILER, 1986; PATIL *et al.*, 2014; QUIROGA *et al.*, 2019, KHANAL *et al.*, 2021), os estudos publicados na literatura não apresentam um consenso em relação à metodologia a ser utilizada para o seu dimensionamento.

Por outro lado, a metodologia de projeto apresentada por Tailer (1986) mostrou-se viável, possibilitando o desenvolvimento de uma bomba espiral sustentável aplicável a cursos d'água. No entanto, Tailer (1986) recomenda que sua utilização associada a uma roda d'água seja realizada em cursos d'água com velocidade de escoamento igual ou superior a 0,6 m/s.

A região Oeste da Bahia é drenada por diversos rios que contribuem para a manutenção da vazão do rio São Francisco, com destaque para o rio Grande, cuja bacia abrange a totalidade do território dos seguintes municípios: Angical, Barreiras, Catolândia, Cotegipe, Cristópolis, Formosa do Rio Preto, Luís Eduardo Magalhães, Mansidão, Riachão das Neves, Santa Rita de Cássia e Wanderley (MOREIRA & SILVA, 2010).

Segundo Gonçalves *et al.* (2016) o rio Grande localiza-se na porção média da bacia hidrográfica do rio São Francisco, sendo seu principal afluente no estado da Bahia. Entre os principais afluentes do rio Grande, destacam-se o rio Preto, o rio Branco, o rio de Ondas e o rio das Fêmeas, cujas vazões nos períodos de estiagem são mantidas essencialmente pelo escoamento subterrâneo do Sistema Aquífero Urucuia.

A presença desses rios é de extrema importância para pequenas propriedades rurais e comunidades situadas às suas margens, sendo comum o aproveitamento da energia do escoamento para recalque de água dos próprios rios, visando atender usos como o consumo doméstico, a dessedentação animal e a irrigação de pequenos cultivos.

Conforme Porto (2006), as velocidades de escoamento em condutos livres variam em função de diversos fatores, como a declividade do terreno, a geometria da seção transversal, as condições do leito e as condições de jusante. Dessa forma há de se esperar que as velocidades de escoamento nos rios da região Oeste da Bahia variem substancialmente ao longo do seu curso, atingindo por vezes velocidades de escoamento inferiores ao limite sugerido por Tailer (1986), o que inviabilizaria a utilização da bomba espiral em muitos locais da região.

No entanto, considerando algumas experiências práticas divulgadas informalmente por inventores nos últimos anos, estabeleceu-se a hipótese de que uma bomba espiral projetada conforme a metodologia proposta por Tailer (1986) poderia ser utilizada para recalque em rios com velocidades de escoamento inferiores a 0,6 m/s.

Nesse contexto, essa pesquisa se justifica tanto do ponto de vista social, por buscar contribuir com uma solução ambientalmente sustentável e de baixo custo para o recalque de água em pequenas propriedades rurais, quanto no aspecto técnico-científico, pela tentativa de contribuir com a literatura, trazendo resultados mais detalhados sobre o funcionamento da bomba espiral, tendo como base as condições da região Oeste da Bahia.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Desenvolver uma bomba espiral de baixo custo para recalque de água em cursos d'água com baixa velocidade de escoamento.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Projetar, construir e instalar uma bomba espiral para recalque de água em cursos d'água com baixa velocidade de escoamento;
- Quantificar os custos de construção do equipamento;
- Avaliar o desempenho da bomba espiral em diferentes condições de funcionamento.

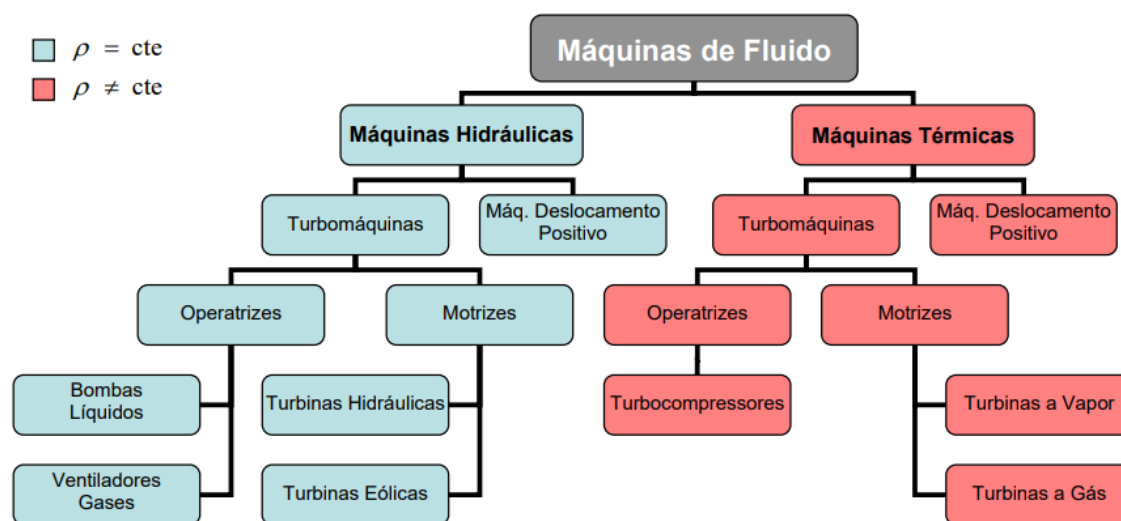
3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 MÁQUINAS DE FLUIDO

A máquina de fluido, do inglês *fluid machinery*, consiste em um dispositivo empregado a fim de promover a troca de energia entre sistemas mecânicos e fluidos, resultando assim na transferência de energia da máquina para o fluido ou o contrário, ou seja, do fluido para a máquina. Na primeira situação o índice energético de um fluido aumenta por meio do fornecimento de energia mecânica, e o sistema é denominado de máquina de fluido geradora. Na segunda situação, em que a energia mecânica é resultante da redução do valor energético de um fluido, o dispositivo é denominado de máquina de fluido motora (HENN, 2001).

No fluxograma apresentado na Figura 1, esquematizado por Brasil (2006), ilustra-se a classificação das máquinas de fluido.

Figura 1 – Classificação sistemática das máquinas de fluido.



Fonte: Brasil (2006).

Na classificação apresentada na Figura 1, considera-se se há variação ou não na massa específica (ρ) do fluido (RAMOS & SILVA, 2009). Conforme Brasil (2006) na máquina hidráulica o fluido faz a troca da energia sem variar sensivelmente sua densidade em seu percurso através do maquinário. Assim, é considerada a hipótese de $\rho = \text{constante}$. Já na máquina térmica o fluido, durante seu percurso no maquinário, sofre alterações sensíveis em seu volume específico e densidade. Assim, não é possível considerar $\rho = \text{constante}$.

De acordo com Henn (2001) existem dois tipos principais de máquinas de fluido, sendo elas: máquinas de deslocamento positivo (MDP) e máquinas de fluxo (MF). Nas máquinas de deslocamento positivo a troca de energia ocorre por meio do confinamento do fluido em câmaras situadas entre a carcaça do maquinário e um elemento com movimento rotativo e alternativo. Quanto às máquinas de fluxo, essas trabalham como um transformador de energia, onde o meio operante é um fluido que quando passa pela máquina, relaciona-se com um elemento rotativo, não se mantendo confinado em nenhum momento.

3.2 MÁQUINAS DE FLUXO

Conforme Logan Jr *et al.* (2003), as máquinas de fluxo são dispositivos que realizam o fluxo contínuo de um fluido através de um elemento rotativo dotado de pás, que extrai ou transfere energia para o fluido pela ação do seu movimento. Se a energia é extraída do fluido, submetendo-o a uma redução de pressão, os dispositivos são chamados de turbinas. Por outro lado, se a energia for transferida para o fluido, aumentando sua pressão, os dispositivos são denominados bombas.

Bombas são máquinas geratrizes cuja finalidade é realizar o deslocamento de um líquido por escoamento. Sendo uma máquina geratriz, transforma o trabalho mecânico que recebe para seu funcionamento em energia, que é comunicada ao líquido sob as formas de energia de pressão e cinética (MACINTYRE, 1997). São máquinas que transferem o trabalho mecânico de seus componentes para um fluido, que passa a escoar com maior energia (DENÍCULI, SILVA & OLIVEIRA, 2002).

A escolha da bomba é determinada, principalmente, pelas condições de operação e de manutenção e, ainda, por considerações econômicas. Naturalmente, é mais interessante instalar uma unidade que forneça a vazão desejada de fluido para a pressão necessária (AZEVEDO NETTO *et al.*, 2003).

De acordo com Macintyre (1983), as turbinas hidráulicas são máquinas motrizes hidráulicas que realizam o aproveitamento das forças devidas à velocidade de escoamento da água, provocando a mudança contínua na direção do escoamento da água ao passar por um rotor dotado de pás e, conseqüentemente, provocando um momento em relação ao eixo de rotação.

As turbinas hidráulicas têm grande aplicação na geração de energia elétrica, tendo sido desenvolvidas a partir do século XIX (LOGAN JR *et al.*, 2003). Por serem mais eficientes na conversão de energia, as turbinas hidráulicas passaram a substituir

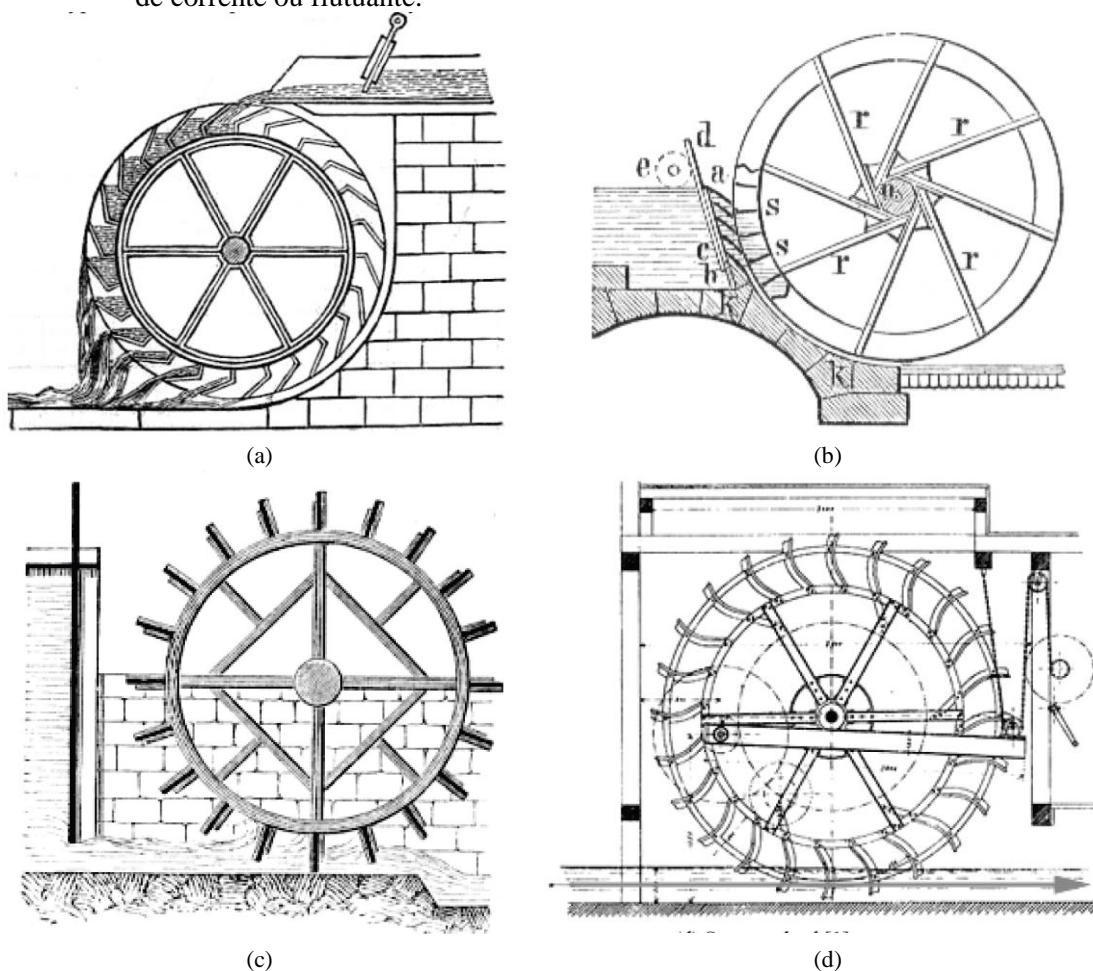
outra máquina motriz hidráulica interessante, a roda d'água, na geração de energia elétrica (QUARANTA *et al.*, 2015). No entanto, atualmente as rodas d'água têm sido reconsideradas como uma forma limpa e acessível de microgeração de energia elétrica, devido ao crescente interesse por fontes de energia renováveis, uma vez que as turbinas hidráulicas não apresentam custo-benefício favorável em locais com baixas cargas hidráulicas disponíveis, além de apresentarem impactos negativos sobre os ecossistemas locais (MÜLLER *et al.*, 2007; QUARANTA *et al.*, 2015; QUARANTA, 2018).

3.2.1 Rodas d'água

A roda d'água foi, provavelmente, o primeiro método de utilização de energia mecânica desenvolvido para substituir o trabalho de humanos e animais. As primeiras rodas d'água (ou também chamadas de rodas hidráulicas) foram construídas por volta de 200 a.C. (LINSINGEN, 2003), perdurando seu uso até os dias atuais através dos moinhos de água. Sua evolução culminou nas atuais e potentes turbinas hidráulicas das centrais hidrelétricas, que geram até milhões de watts de potência.

Segundo Macintyre (1983) roda d'água (ou roda hidráulica) é uma máquina motriz rudimentar, de bom rendimento, em que a água transfere energia para as suas pás, seja pela ação do seu peso ou da sua velocidade. Seu uso é restrito a fazendas, sítios e pequenas indústrias, onde são utilizadas para acionar moinhos, engenhos de serra, bombas e pequenos geradores elétricos. O tipo de energia predominante no acionamento da roda d'água depende da sua configuração ou, mais especificamente, da zona de entrada de água, critério que possibilita classificar as rodas d'água em rodas de cima, rodas de lado, rodas de baixo e rodas de corrente (flutuantes) (Figura 2).

Figura 2 – Tipos de roda d'água: (a) roda de cima, (b) roda de lado, (c) roda de baixo e (d) roda de corrente ou flutuante.



Fonte: adaptado de Tevataa & Inprasit (2011).

A roda de cima é mais adequada para locais com disponibilidade de altas cargas hidráulicas, enquanto a roda de lado é aplicada em locais com menor disponibilidade de carga, apresentando menor eficiência do que a roda de cima. Já a roda de baixo é utilizada em locais com baixa disponibilidade de carga hidráulica, enquanto a roda de corrente é acionada apenas pela carga cinética (ZHAO *et al.*, 2020).

De acordo com Macintyre (1983), as rodas de cima, de lado e de baixo podem ser utilizadas em associação com bombas de êmbolo para a elevação de água em sítios e fazendas onde exista um pequeno curso d'água. No entanto, na região Oeste da Bahia as bombas de êmbolo são frequentemente associadas a rodas flutuantes, sendo comum sua utilização por pequenos produtores e moradores ribeirinhos, em cursos d'água de maior porte como os rios Grande, Preto e de Ondas.

3.3 MÁQUINAS DE DESLOCAMENTO POSITIVO (MDP)

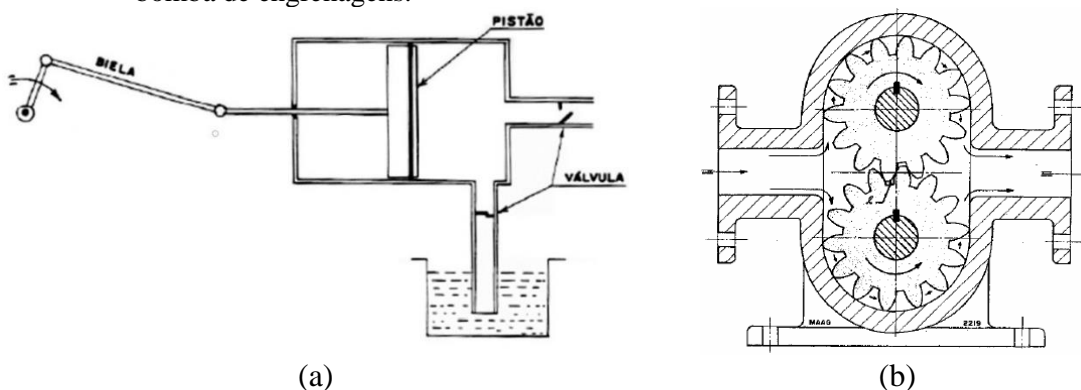
As máquinas de deslocamento positivo deslocam uma quantidade fixa de fluido a cada volta, ou golpe, do dispositivo (FOUST et al., 1982). Quando em funcionamento, a variação de energia de pressão estática ocorre pela variação do volume das câmaras onde o fluido fica confinado, as quais se preenchem e se esvaziam, isolando o fluido que mantém contato com a tubulação de admissão daquele que se comunica com a canalização de descarga (HENN, 2001).

Ramos e Silva (2009) explicam que as MDP são também chamadas de máquinas estáticas, o processo ocorre por meio de um deslocamento positivo, com uma quantidade fixa de fluido de trabalho se mantendo em confinamento durante a passagem no maquinário e ainda submetida a troca de pressão frente à alteração no volume do recipiente, ou seja, o fluido precisa obrigatoriamente alterar seu estado vistos os movimentos que ocorrem em uma fronteira.

Conforme Brasil (2010), as MDP podem ser compostas por uma ou mais câmaras, em cujo interior o movimento de um órgão propulsor comunica energia de pressão ao líquido, provocando o seu escoamento. Assim, obtém-se as condições necessárias para garantir o escoamento na tubulação de aspiração até a bomba e na tubulação de recalque até o ponto de utilização.

Conforme Ramos e Silva (2009), são exemplos de MDP as bombas alternativas (Figura 3.a) e as bombas de engrenagens (Figura 3.b). Em ambos os modelos, a pressão de saída se define por meio da pressão na canalização de descarga, onde a pressão pode se apresentar em baixo, médio ou alto nível. O controle da pressão é feito, em geral, por meio de válvulas instaladas na tubulação de descarga.

Figura 3 – Exemplos de máquinas de deslocamento positivo: a) bomba alternativa de pistão e b) bomba de engrenagens.



Fonte: Ramos e Silva (2009).

Fraenkel (1986) apresenta diversas máquinas de deslocamento positivo aplicáveis especificamente no bombeamento de água para irrigação, tais como a bomba de pistão, a bomba de diafragma, o parafuso de Arquimedes, a bomba rosário e as bombas de bobina. Estas últimas, que se dividem em espirais e helicoidais, podem elevar água a uma altura entre 5 a 10 m, apresentando como vantagem a simplicidade mecânica, sendo ideais para acoplamento a rodas d'água, devido à baixa velocidade e ao alto torque necessários para o seu funcionamento.

De acordo com Quiroga *et al.* (2019), a bomba de bobina é um sistema de construção fácil, baseado no parafuso de Arquimedes, que se constitui em uma solução de baixo custo e fácil implementação. Quando associada à uma roda d'água do tipo flutuante, transforma a energia cinética do escoamento em energia potencial expressa pela alta pressão da água na saída da bomba, sem o consumo de eletricidade ou combustíveis fósseis.

Diversas configurações de bombas de bobina vêm sendo estudadas recentemente (MORTIMER & ANNABLE, 1984; TAILER, 1986; PATIL *et al.*, 2014; QUIROGA *et al.*, 2019; KHANAL *et al.*, 2021), tendo em vista sua simplicidade de fabricação e baixo custo, o que as torna uma opção interessante para o bombeamento de água em pequenas propriedades rurais, inclusive na região Oeste da Bahia, onde, conforme mencionado anteriormente, é muito comum a utilização de rodas flutuantes no acionamento de dispositivos para recalque de água. No entanto, os dispositivos comumente utilizados na região para recalque de água são as bombas de pistão.

Tendo em vista que as bombas de pistão não são adequadas para líquidos que contenham partículas abrasivas (HENN, 2001), o que pode danificar os elementos de vedação da bomba, seu uso nos rios da região Oeste da Bahia exige manutenção frequente, tendo em vista que durante a estação chuvosa o transporte de sedimentos aumenta significativamente. Nessas condições, a bomba de bobina pode representar uma opção de menor custo de manutenção.

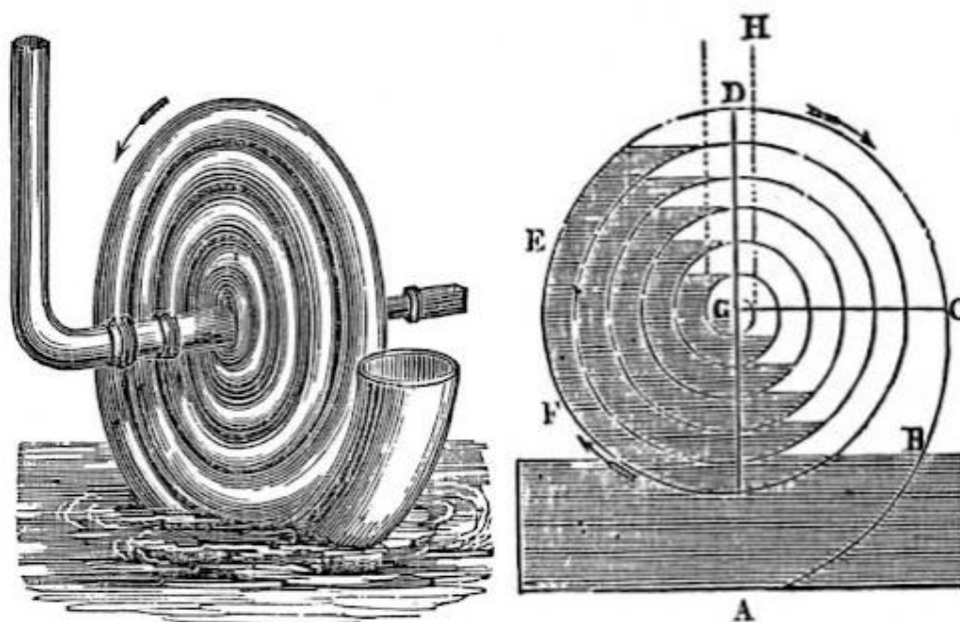
3.3.1 Bombas de bobina

As bombas de bobina são classificadas como máquinas de deslocamento positivo rotativas (FRAENKEL, 1986). Em geral, se dividem em duas categorias: bombas helicoidais, nas quais a bobina é formada por uma série de voltas todas do mesmo raio, como uma mangueira enrolada em torno de um cilindro, e bombas espirais, nas quais a bobina é formada por um arranjo essencialmente plano em que o raio

diminui a cada volta. No entanto, não há uma padronização da nomenclatura, visto que alguns autores usam os termos "bomba espiral", "bomba de bobina" ou "bomba manométrica" para se referirem a geometrias helicoidais e espirais (DEANE & BEVAN, 2018).

A bomba de bobina espiral, ou simplesmente bomba espiral, foi inventada em 1746, por H. Andreas Wirtz, um ferreiro de Zurique, Suíça, com o objetivo de recalcar água para uma obra. Pouco se tem registrado sobre o criador ou as circunstâncias que culminaram na criação a bomba. Acredita-se que Wirtz possuía algum conhecimento sobre outros tipos de bombas que já eram empregadas há muitos séculos antes. No entanto, eram dispositivos limitados, não possuindo capacidade de bombear água para alturas mais elevadas do que as suas próprias alturas. A habilidade de Wirtz com o metal foi essencial no desenvolvimento da bomba em espiral tubular (TAILER, 1986). Na Figura 4, apresenta-se uma referência histórica da bomba espiral de Wirtz.

Figura 4 – Bomba de bobina espiral desenvolvida por H. Andreas Wirtz.

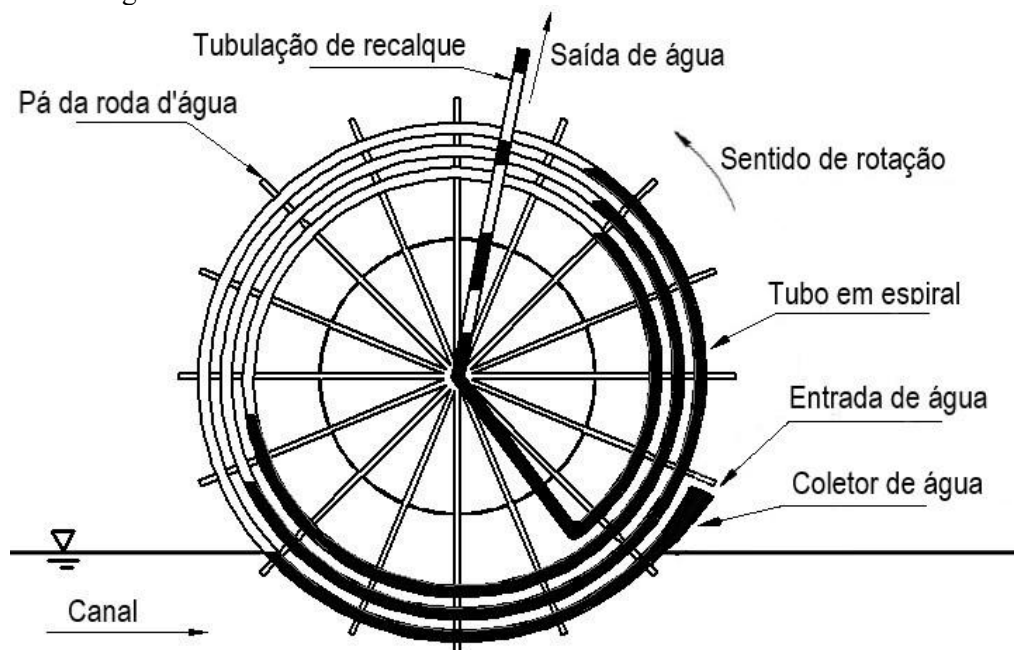


Fonte: Tailer (1986).

A bomba de bobina usa sua rotação para produzir um diferencial de pressão incremental para bombear líquidos. Basicamente, é composta por um tubo flexível, geralmente uma mangueira enrolada em várias voltas, que fica parcialmente submerso no fluido a ser bombeado (Figura 5). A energia para o acionamento desta bomba normalmente provém do escoamento da água em um curso d'água, de modo que a

bomba é acoplada a uma roda d'água que transforma a energia cinética do escoamento em energia mecânica para rotação da bomba (QUIROGA *et al.*, 2019).

Figura 5 – Representação esquemática de uma bomba de bobina espiral acoplada a uma roda d'água.

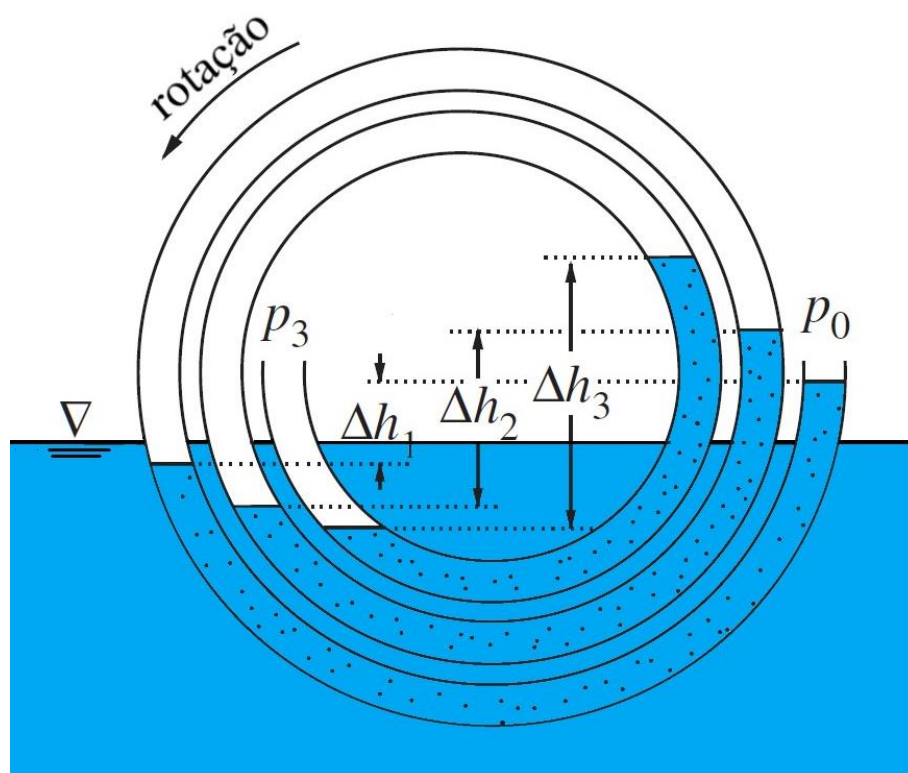


Fonte: adaptado de Morgan (1984) e Quiroga *et al.* (2019).

Deane & Bevan (2018) comparam a configuração da bomba espiral a uma série de manômetros conectados, em que a diferença de pressão entre as duas extremidades é dada pela soma das colunas de líquido em seu interior. Assim, conforme ilustrado na Figura 6, em que o tubo em espiral contém sucessivas colunas de ar e água, a diferença de pressão $p_3 - p_0$ é igual ao somatório das diferenças de altura $\Delta h_1 + \Delta h_2 + \Delta h_3$, tendo em vista que a massa específica do ar é muito menor do que a da água e pode ser desprezada.

Ainda segundo Deane & Bevan (2018), é o deslocamento do fluido de maior densidade (no caso, a água) que gera pressão dentro do fluido de menor densidade (no caso, o ar), o que denota a importância da alternância de colunas de ar e água para o funcionamento da bomba. A mangueira em espiral somente pode ser preenchida dessa maneira se sua extremidade aberta às vezes estiver submersa em água e às vezes estiver exposta ao ar. O fato de a bomba estar parcialmente submersa em água, conforme indica a posição do nível da água ilustrada na Figura 6, impõe este padrão de enchimento à medida em que a espiral gira.

Figura 6 – Ilustração do princípio de funcionamento da bomba de bobina espiral.

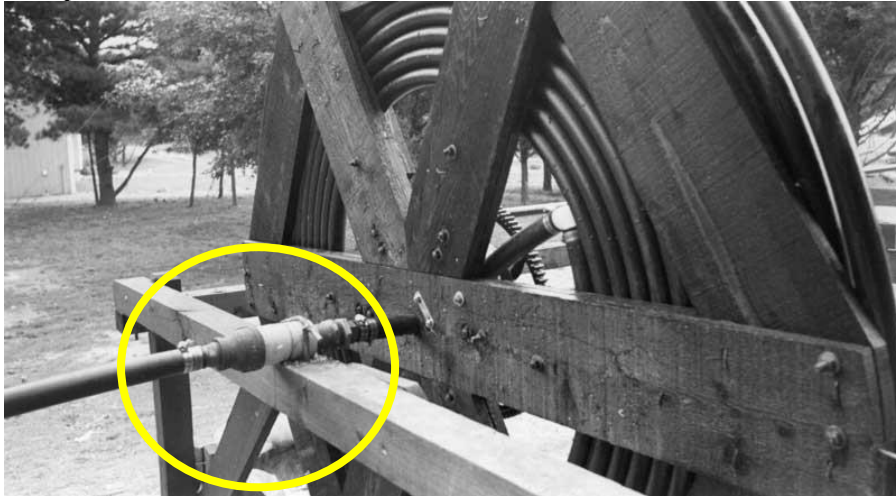


Fonte: adaptado de Deane & Bevan (2018).

O movimento da bomba espiral faz com que, a cada nova rotação, o coletor de água instalado na entrada da mangueira colete cerca de metade do volume interno da primeira volta da espiral. À medida em que a água é levada para as espirais mais internas, cada coluna de água transmite a pressão, através do ar aprisionado, para a coluna mais interna. A repetição deste aumento de pressão cria uma pressão cumulativa, à medida em que se avança para o centro da espiral, o que permite bombear a água para alturas consideráveis (TAILER, 1986).

Em geral, a água oriunda da bobina é direcionada para o interior do eixo da própria bobina. Como este realiza um movimento giratório, e a tubulação de recalque é estacionária, é necessário acoplar o eixo à tubulação de recalque por meio de uma junta rotativa, conforme pode ser visualizado na Figura 7. De acordo com Tailer (1986), essa junta é um componente crítico da bomba de bobina, devendo promover estanqueidade para prevenir vazamentos de ar e água, o que leva a perda de pressão. Morgan (1984) afirma que, apesar de a junta rotativa necessitar de aperto ou reposição periódica, uma junta com boa vedação pode durar vários anos.

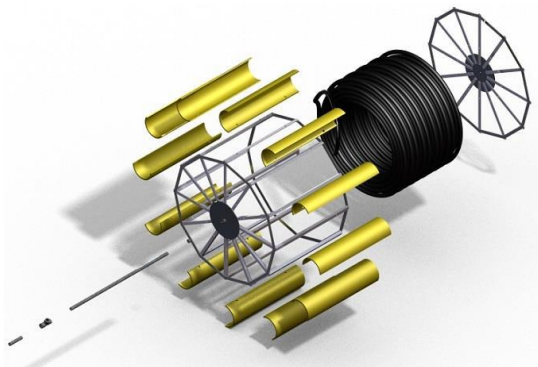
Figura 7 – Junta rotativa para acoplamento do eixo da bomba à tubulação de saída da bomba espiral.



Fonte: Tailer (1986).

Quiroga *et al.* (2019) apresentaram uma bomba de bobina helicoidal acoplada a uma roda d'água flutuante, a qual foi instalada e testada numa comunidade rural na cidade de Santander, na Colômbia. A bobina foi construída com mangueira de irrigação e acoplada a uma roda d'água cujas pás foram construídas com tubos de PVC cortados transversalmente, e todo o conjunto foi apoiado sobre uma estrutura metálica contendo flutuadores (Figura 8).

Figura 8 - Bomba de bobina helicoidal instalada em uma comunidade rural em Santander, Colômbia: (a) representação esquemática e (b) conjunto apoiado sobre a estrutura metálica.



(a)



(b)

Fonte: Quiroga *et al.* (2019).

3.3.2 Aspectos relativos ao dimensionamento de bombas de bobina espirais

A diferença entre os modelos de bombas de bobina espirais e helicoidais está na variação da curvatura da mangueira em cada ponto. Enquanto na bomba espiral a curvatura varia em cada ponto, na bomba helicoidal a curvatura é constante em todos os pontos. Ou seja, a bomba em espiral apresenta variação de diâmetro a cada volta da mangueira, que diminui ao longo da sua estrutura; já a bomba helicoidal apresenta todas as voltas da mangueira com mesmo diâmetro.

De acordo com Tailer (1986), as bombas helicoidais são recomendadas para locais em que as alturas de elevação são pequenas, enquanto nos casos em que há necessidade de elevar a água a alturas maiores, as bombas espirais são mais indicadas.

Nesta seção, serão tratados alguns aspectos relativos ao dimensionamento de bombas de bobina. Alguns trabalhos consultados se referem a bombas de bobina em geral, podendo ser aplicados tanto a bombas helicoidais quanto espirais (MORTIMER & ANNABLE, 1984; QUIROGA *et al.*, 2019). No entanto, será dada ênfase ao dimensionamento de bombas espirais, tendo em vista a sua maior aplicabilidade em função de atingir maiores alturas de elevação.

O primeiro aspecto importante a ser considerado no projeto de uma bomba espiral é a definição da altura de elevação desejada. Segundo Quiroga *et al.* (2019), o número de voltas de mangueira interfere no número de colunas de água no interior da bobina, o que afeta a altura de elevação da bomba. Assim, quanto maior o número de voltas de mangueira, maior é a pressão obtida, não havendo, entretanto, alteração na vazão. Tailer (1986) acrescenta ainda que quanto maior o diâmetro da primeira volta da espiral, maior a pressão produzida.

O cálculo da altura de elevação da bomba de bobina pode ser realizado a partir do somatório das diferenças de pressão geradas por cada coluna de água no interior da bobina (MORTIMER & ANNABLE, 1984; QUIROGA *et al.*, 2019):

$$H = H_T - H_A = \sum_i^N h_i \quad (1)$$

em que:

H – altura de elevação (m);

H_T – carga de pressão absoluta na saída da bomba (m);

H_A – pressão na entrada da bomba, igual à pressão atmosférica (m);

h_i – diferencial de pressão produzido pela i -ésima coluna de água (m);

N – número total de voltas da bobina.

As colunas de ar estão sujeitas a contração e alongamento devido às diferentes pressões ao longo da mangueira, desde a entrada até a saída da bobina, e seus comprimentos dependem do comprimento do trecho percorrido pelo coletor de água quando está acima da superfície. Especificamente para a primeira volta da mangueira, o volume inicial da coluna de ar depende da geometria da bobina, do diâmetro interno da mangueira e da profundidade de submersão da bomba. Como as colunas de ar são limitadas pelas colunas de água adjacentes, diferentes pressões são desenvolvidas em cada coluna de ar ao longo da mangueira (QUIROGA *et al.*, 2019).

À medida em que as colunas de ar se movem da entrada para a saída da bobina, o aumento de pressão reduz os seus volumes gradativamente. Mortimer & Annable (1984) afirmam que a seguinte relação é válida para relacionar os volumes das colunas de ar ao longo da mangueira:

$$P_{Ai}V_{Ai}^{1,15} = \text{constante} \quad (2)$$

em que:

P_{Ai} – pressão absoluta na i -ésima coluna de ar (m);

V_{Ai} – volume da i -ésima coluna de ar (m^3).

Assumindo-se que o diâmetro interno da mangueira é constante, a equação (2) pode ser reescrita da seguinte forma (MORTIMER & ANNABLE, 1984):

$$P_{A1}L_{A1}^{1,15} = P_{Ai}L_{Ai}^{1,15} \quad (3)$$

em que:

P_{A1} – pressão absoluta na primeira volta da espiral (m);

L_{A1} – comprimento da primeira coluna de ar, à entrada da bomba (m);

P_{Ai} – pressão absoluta na i -ésima volta da espiral (m);

L_{Ai} – comprimento da i -ésima coluna de ar (m).

Rearranjando a equação (3), e considerando que P_{A1} corresponde à pressão atmosférica, pode-se calcular a variação de comprimento das colunas de ar em relação à primeira volta da bobina (MORTIMER & ANNABLE, 1984):

$$L_{A1} - L_{Ai} = L_{A1} \left[1 - \left(\frac{H_A}{P_{Ai}} \right)^{0,87} \right] \quad (4)$$

Considerando que em uma espiral o raio diminui da entrada para a saída em função do ângulo, se essa função for conhecida é possível determinar o comprimento e, conseqüentemente, o volume de cada volta da mangueira de uma bomba espiral. Ainda, considerando-se que o volume das colunas de água no interior da espiral se mantém constante a cada volta, a redução do volume de cada volta da espiral deve ser compensada pela redução no volume da coluna de ar (DEANE & BEVAN, 2018). Dessa forma, por meio da equação (4) é possível determinar qual deve ser o comprimento da última coluna de ar para que uma dada pressão de saída seja atingida.

No entanto, a consideração da relação adiabática proposta na equação (2) para descrever a variação de volume das colunas de ar é criticada por Deane & Bevan (2018), que sugerem ser mais adequado o uso da Lei de Boyle. De fato, Tailer (1986) utiliza a Lei de Boyle para deduzir uma equação para o dimensionamento da bomba de bobina espiral, assumindo as seguintes pressuposições:

(i) a bobina é representada por uma série de tubos em “U”, estáticos e interconectados, e cada tubo é dimensionado de forma a conter a soma do volume de água e do volume de ar. O volume da coluna de água permanece constante em todas as voltas da espiral, sendo igual à metade do volume interno da primeira volta. Por outro lado, o volume total de cada tubo em “U” decresce a cada volta, tendo em vista que o ar é compressível;

(ii) a carga de pressão dentro de cada espiral é igual ao diâmetro da respectiva espiral.

Assim, baseado na Lei de Boyle e nessas pressuposições, Tailer (1986) propõe a seguinte relação para a variação no volume das colunas de ar:

$$P_1 V_{A1} = P_N V_{AN} \quad (5)$$

em que:

P_1 – Pressão absoluta na primeira volta da espiral (m);

V_{A1} – volume da primeira coluna de ar (m³);

P_N – Pressão absoluta na N-ésima (última) volta da espiral (m);

V_{AN} – volume da N-ésima (última) coluna de ar (m^3).

As pressões na primeira e na última coluna de ar são obtidas pelo somatório dos diferenciais de pressão a cada volta. Pela segunda pressuposição de Tailer (1986), na primeira volta da espiral o diferencial de pressão (h_1) gerado é igual ao diâmetro (D_1) dessa primeira volta:

$$P_1 = H_A + h_1 = H_A + D_1 \quad (6)$$

em que:

h_1 – diferencial de pressão produzido pela primeira coluna de água (m);

D_1 – diâmetro da primeira espiral (ou da espiral mais externa) (m).

Na última volta da espiral, a pressão absoluta é igual à pressão atmosférica mais o somatório dos diferenciais de pressão gerados a cada volta da mangueira:

$$P_N = H_A + \sum_i^N h_i = H_A + H \quad (7)$$

Para o cálculo do volume da coluna de ar na primeira volta da mangueira, Tailer (1986) propõe a seguinte equação:

$$V_{A1} = \pi \left(\frac{d}{2}\right)^2 h_1 = \pi \left(\frac{d}{2}\right)^2 D_1 \quad (8)$$

em que:

d – diâmetro interno da mangueira (m).

De forma semelhante, o volume da coluna de ar na última volta da mangueira pode ser calculado como segue (TAILER, 1986):

$$V_{AN} = \pi \left(\frac{d}{2}\right)^2 h_N = \pi \left(\frac{d}{2}\right)^2 D_N \quad (9)$$

em que:

h_N – diferencial de pressão produzido pela N-ésima (última) volta da espiral (m);

D_N – diâmetro da N-ésima (última) volta da espiral (m).

Substituindo as equações (6), (7), (8) e (9) na equação (5), Tailer (1986) obtém a expressão para o cálculo do diâmetro da última volta da espiral:

$$D_N = \frac{(H_A + D_1)D_1}{(H_A + H)} \quad (10)$$

Para determinar o número de voltas da espiral, Tailer (1986) propõe que a altura de elevação (H) seja considerada igual ao diferencial de pressão médio produzido na espiral, dado pela média do primeiro e do último diferencial de pressão produzidos, multiplicado pelo número de voltas da mangueira:

$$H = N \frac{(h_1 + h_N)}{2} = N \frac{(D_1 + D_N)}{2} \quad (11)$$

Isolando-se o número de voltas da espiral (N) na equação (11), obtém-se:

$$N = \frac{2H}{(D_1 + D_N)} \quad (12)$$

Por meio das equações (10) e (12) é possível calcular, a partir da definição prévia da altura de elevação (H) e do diâmetro da primeira volta (D_1) da espiral, o diâmetro da última volta da espiral (D_N) e o número de espirais (N). Tailer (1986) recomenda que seja adicionada uma margem de 20% ao número de espirais calculado, de modo a considerar eventuais variações no diâmetro da mangueira e outras variáveis.

Outro aspecto importante a ser considerado no projeto de uma bomba espiral é a vazão fornecida. Quiroga *et al.* (2019) afirmam que o volume de água transportado pela bomba depende da área da seção transversal da mangueira. Nesse sentido, Mortimer & Annable (1984) propõem que a vazão seja determinada pela seguinte equação:

$$Q = \pi \left(\frac{d}{2}\right)^2 L_{w1} N_s \quad (13)$$

em que:

L_{w1} – comprimento da primeira coluna de água, à entrada da bomba (m);

N_s – frequência de rotação da bomba (s^{-1}).

Como Tailer (1986) pressupõe que o volume das colunas de água seja igual à metade do volume interno da primeira volta da mangueira, pode-se assumir, para o cálculo da vazão, que o comprimento da primeira coluna de água (L_{W1}) é igual à metade da circunferência da primeira volta da mangueira.

No entanto, conforme apontam Deane & Bevan (2018), o comprimento da primeira coluna de água pode ser alterado variando a profundidade de submersão da bobina, o que pode fazer com que o valor calculado pela equação (13) seja diferente da vazão real recalçada pela bomba. De fato, Quiroga *et al.* (2019) explicam que a vazão fornecida pela bomba é afetada pela alteração da profundidade de submersão da bomba e também pela velocidade de rotação, e observam que o aumento em qualquer um desses parâmetros causa aumento na vazão da bomba sem, no entanto, afetar a pressão de saída.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 CONCEPÇÃO, FABRICAÇÃO E INSTALAÇÃO DA BOMBA ESPIRAL

4.1.1 Dimensionamento da bomba espiral

Inicialmente, foi definida a altura de elevação desejada (H) para bombeamento da água. Arbitrou-se, em princípio, uma altura total de 10 m, considerando a possibilidade de recalcar água de um rio para um reservatório em locais com altura geométrica da ordem de 5 a 8 metros, com certa folga para possíveis perdas de energia. A altura de elevação foi ajustada posteriormente para 9,6 m, no intuito de adequar as dimensões da espiral e o número de voltas necessário.

Em seguida, foi estimada a pressão atmosférica no local de instalação da bomba, com base na altitude do local, que é de aproximadamente 540 m, utilizando-se a seguinte equação (PORTO, 2006):

$$H_A = 13,6 \frac{760 - 0,081h}{1000}$$

em que:

h – Altitude do local (m).

Definida a altura total de elevação e a pressão atmosférica local, arbitrou-se o valor do diâmetro externo da primeira volta da espiral (D_1). Como a intenção era utilizar as hastes laterais das pás da roda d'água como apoio para fixação das espirais da mangueira flexível, o diâmetro externo da primeira volta da espiral deveria ser aproximadamente igual ao diâmetro do rotor da roda d'água. Assim, o diâmetro externo da primeira volta da espiral foi fixado em 1,06 m, de modo que as dimensões do rotor da roda d'água não fossem demasiadamente grandes para dificultar seu transporte e elevar os custos de fabricação.

Em seguida, foi calculado o diâmetro da última volta da espiral (D_N), por meio da Equação 10. Assim, foi possível obter o número de voltas da espiral (N) utilizando-se a Equação 12. Conforme as recomendações de Tailer (1986), o número de voltas da espiral foi acrescido de uma margem de segurança de 20%, de forma a compensar eventuais variações no diâmetro da mangueira e outras possíveis variáveis não controladas.

Com base no diâmetro da primeira (D_1) e da última volta da espiral (D_N), bem como no número de voltas da espiral corrigido (N_C), definiu-se o diâmetro da mangueira flexível utilizada para a construção da espiral, levando-se em conta os diâmetros comerciais disponíveis e a espessura da parede da mangueira. A mangueira mais adequada foi a de diâmetro interno de 1/2" (0,0127 m), com espessura de parede de 1,5 mm, o que proporcionou que cada volta da espiral fosse acomodada abaixo da primeira volta, obtendo-se um diâmetro da última volta da espiral condizente com o calculado.

O comprimento total de mangueira necessário para construção da espiral foi calculado da seguinte forma:

$$L = \pi \frac{(D_1 + D_N)}{2} N_C$$

em que:

L – Comprimento total da espiral (m);

N_C – Número de voltas da espiral corrigido.

Para estimativa da vazão recalçada pela espiral (Q), utilizou-se a Equação 13. Na aplicação da equação, estipulou-se uma velocidade de rotação da roda d'água da ordem de 5 rpm, considerando que a velocidade tangencial das pás na sua extremidade seria de aproximadamente $0,3 \text{ m s}^{-1}$ e que o diâmetro do rotor da roda d'água seria de 1,06 m. Considerou-se, ainda, que a cada volta completa da espiral, metade do volume interno da primeira volta de mangueira estaria preenchido por água, e a outra metade estaria preenchida por ar. Assim, o comprimento da primeira coluna de água (L_{W1}) foi considerado igual à metade da circunferência da primeira volta da mangueira.

Para uma coleta de água mais eficiente na entrada da bomba, foi projetada uma concha a ser acoplada no início da espiral, com diâmetro interno de pelo menos duas vezes o diâmetro interno da mangueira.

4.1.2 Dimensionamento da roda d'água

Para acionamento da bomba espiral, foi dimensionada uma roda d'água flutuante com dimensões compatíveis com as definidas para a espiral de mangueira. A roda d'água foi concebida de modo a acomodar duas espirais de mangueira, fixadas nas

laterais do rotor junto às hastes de fixação das pás, no intuito de duplicar a vazão fornecida pela bomba espiral, realizando um melhor aproveitamento da energia do escoamento.

O diâmetro do rotor da roda d'água foi estabelecido em 1,06 m, igual o diâmetro externo da espiral. Para facilitar a construção, reduzir os custos de fabricação e, ao mesmo tempo, aproveitar ao máximo a energia cinética da corrente, estabeleceu-se que o rotor da roda d'água teria 8 pás de 0,28 m de altura e 1,0 m de comprimento.

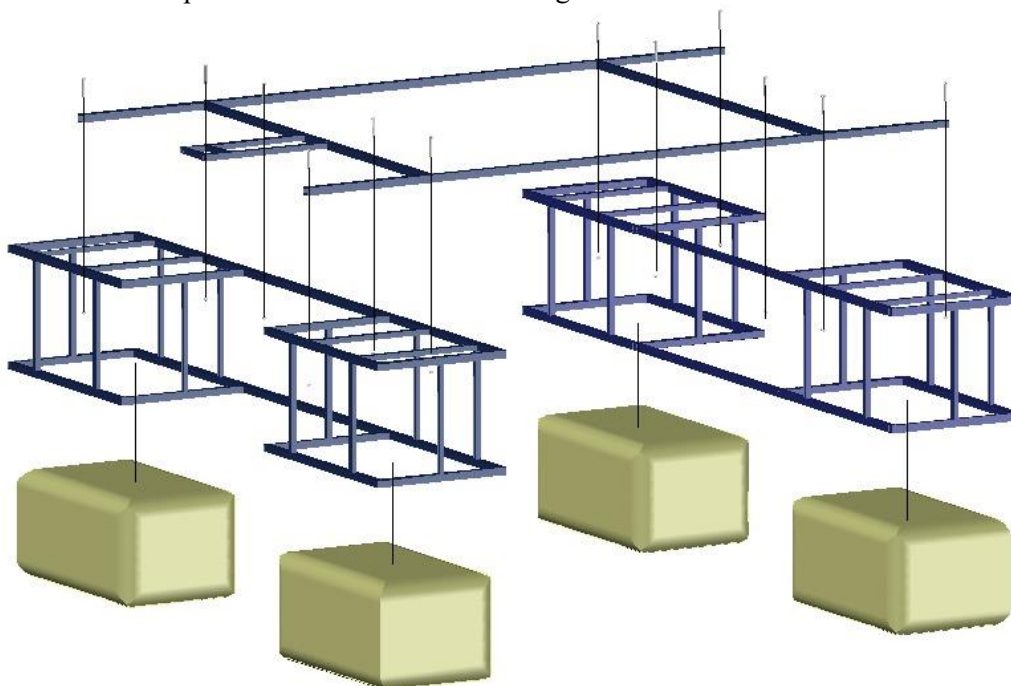
A estrutura da roda d'água foi projetada para ser executada com tubos de aço galvanizado de seção quadrada (metalon). Com base nas dimensões da estrutura e do rotor, foi estimada a massa total do conjunto para, em seguida, definir a altura do eixo do rotor e a posição e o volume necessário para os flutuadores. Estimou-se que a massa total do conjunto seria da ordem de 80 kg, sendo necessário que o volume submerso dos flutuadores fosse de cerca de 80 L para gerar um empuxo equivalente e de sentido contrário à força peso. A altura do eixo foi definida de modo que as pás ficassem totalmente submersas ao passarem pela corrente.

Na Figura 9, apresenta-se a vista superior, e na Figura 10, a vista frontal da roda d'água, com a bomba espiral acoplada. Conforme pode ser visualizado nos desenhos, a estrutura da roda d'água foi projetada para acomodar quatro galões com capacidade de 60 L, totalizando 240 L, dos quais aproximadamente um terço ficariam submersos. Os flutuadores foram posicionados ao lado do rotor da roda d'água, para evitar interferência direta no escoamento e conseqüente redução da energia cinética transferida para o equipamento.

4.1.3 Fabricação e montagem do equipamento

A estrutura da roda d'água foi fabricada com tubos de aço galvanizado de seção quadrada (metalon) com dimensões de 20 x 20 mm e 15 x 15 mm, ambos com espessura de parede de 1,25 mm. Para facilitar o transporte, a estrutura foi fabricada em três partes independentes: duas laterais contendo os compartimentos para acomodação dos flutuadores e uma parte central para fixação dos mancais de rolamento e apoio do eixo do rotor (Figura 11). A união das três partes da estrutura foi realizada com parafusos sextavados de 6 x 50 mm e porcas do tipo borboleta de 6 mm, ambos de aço galvanizado.

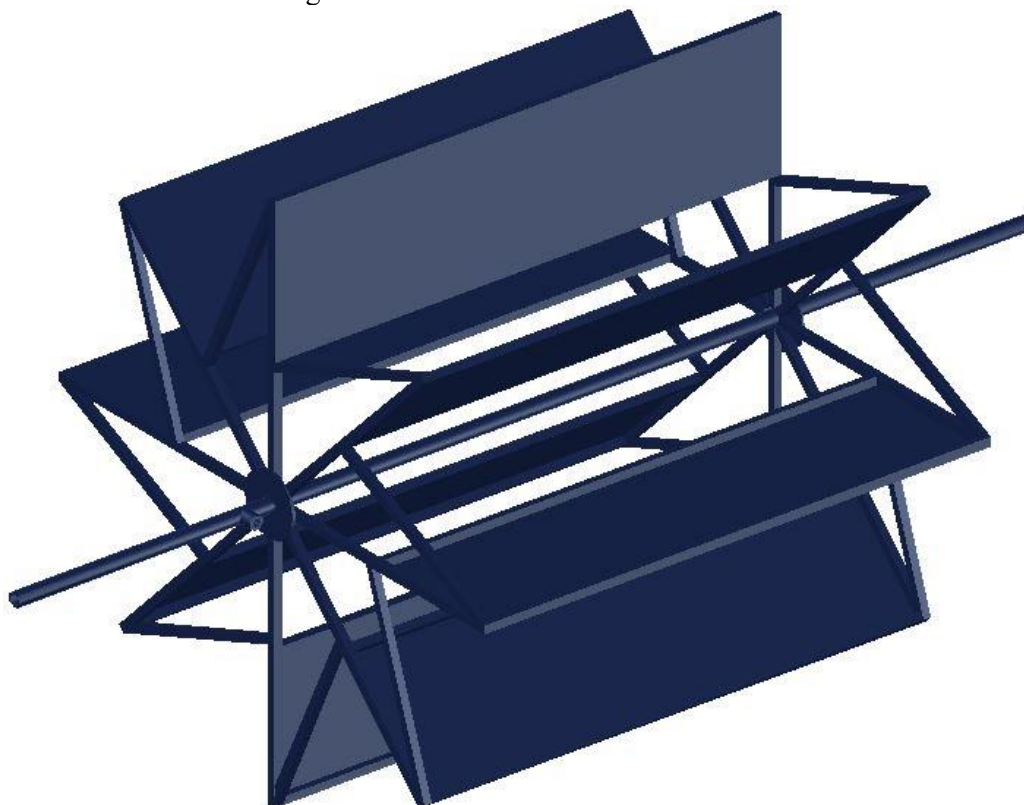
Figura 11 - Vista explodida da estrutura da roda d'água e dos flutuadores.



A estrutura do rotor da roda d'água foi construída com tubos de aço galvanizado de seção quadrada (metalon) com dimensões 15 x 15 mm e espessura de parede de 1,25 mm. O paramento das pás da roda d'água foi construído com chapas de zinco reutilizadas, as quais foram devidamente cortadas e rebitadas na estrutura do rotor. As hastes de fixação do paramento foram soldadas ao eixo do rotor, mantendo um espaçamento de 45° entre as pás. Tendo em vista a necessidade de que a água bombeada pela bomba espiral fosse conduzida para o interior do eixo do rotor da roda d'água, e deste para uma junta rotativa conectada à tubulação de recalque, o eixo do rotor foi

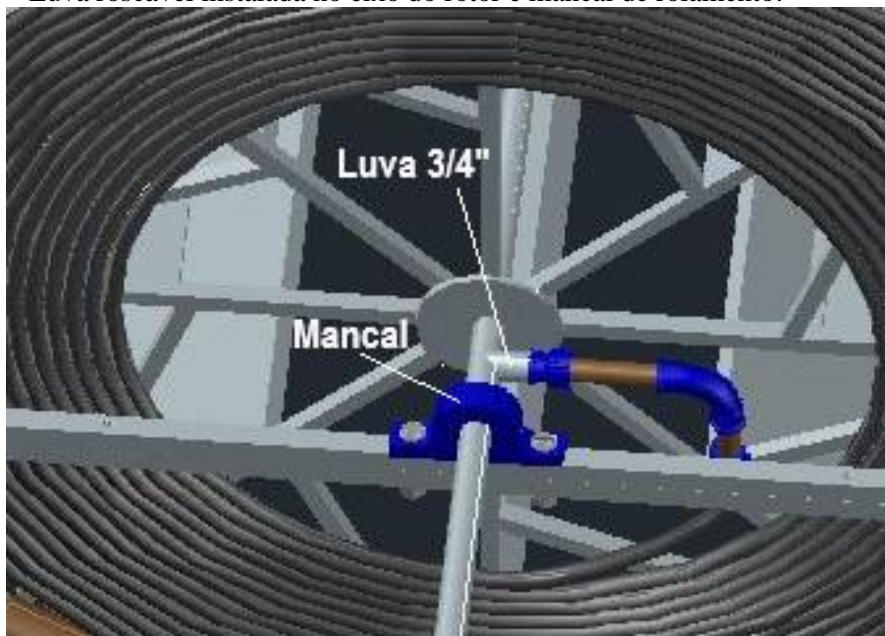
construído com um tubo de aço galvanizado de diâmetro nominal de 3/4", utilizado para condução de água fria (Figura 12). Nas duas extremidades do eixo foram executadas roscas para possibilitar a conexão com acessórios. As roscas foram fabricadas em oficina especializada em serviços de torno mecânico.

Figura 12 – Rotor da roda d'água.



Para conduzir a água das espirais para o interior do eixo do rotor, foi necessário criar duas aberturas no eixo e sobre elas instalar duas conexões. Assim, foram realizados dois furos de 12 mm de diâmetro próximos às extremidades do eixo, e sobre esses dois furos foram soldadas duas luvas roscáveis (rosca interna) de aço galvanizado de 3/4" (Figura 13). Os furos foram executados com defasagem de 180°, de modo que a cada instante, o coletor de uma das espirais estivesse acima da superfície da água e o outro estivesse submerso, contribuindo para um melhor balanceamento das massas em movimento giratório.

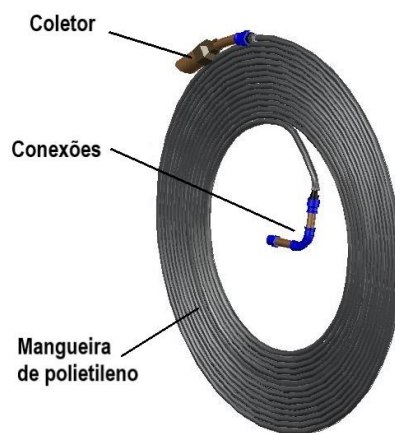
Figura 13 – Luva roscável instalada no eixo do rotor e mancal de rolamento.



O eixo do rotor foi apoiado na estrutura por meio de um conjunto de rolamentos e mancais, de modo a possibilitar o menor atrito possível entre o eixo giratório e a estrutura fixa e, com isso, reduzir as perdas na conversão da energia cinética do escoamento em energia mecânica no eixo da roda d'água. Foram utilizados dois rolamentos rígidos de esferas, com anel externo convexo e anel interno prolongado, de 25 mm de diâmetro interno, os quais foram assentados em dois mancais de ferro fundido aparafusados na estrutura da roda d'água.

As duas espirais foram fabricadas com mangueiras flexíveis de polietileno de diâmetro nominal de 1/2", com diâmetro interno de 0,0127 m e espessura de parede de 1,5 mm. Foram executadas, ao todo, 14 voltas de mangueira, com diâmetro da primeira volta de 1,06 m e diâmetro da última volta de aproximadamente 0,59 m. Na extremidade de entrada da mangueira foi instalado um coletor fabricado com sobras de tubos de PVC de diâmetros nominais de 25 e 50 mm, unidos com luva de redução de PVC 50 x 25 mm. O trecho inicial do coletor foi executado com o tubo de PVC de 50 mm cortado diagonalmente para facilitar a coleta de água (Figura 14). Na extremidade de saída da mangueira foram instaladas conexões de modo a permitir a ligação da espiral com a luva roscável fixada no eixo da bomba.

Figura 14 – Espiral fabricada com mangueira de polietileno.



A fabricação das espirais de mangueira de polietileno foi executada diretamente nas laterais do rotor da roda d'água. Para garantir que a espiral assumisse a forma adequada, a mangueira foi enrolada gradativamente e fixada provisoriamente com arame flexível e fita crepe (Figura 15). Após a montagem completa da espiral, cada volta de mangueira foi fixada nas hastes das pás do rotor com barbante de poliéster.

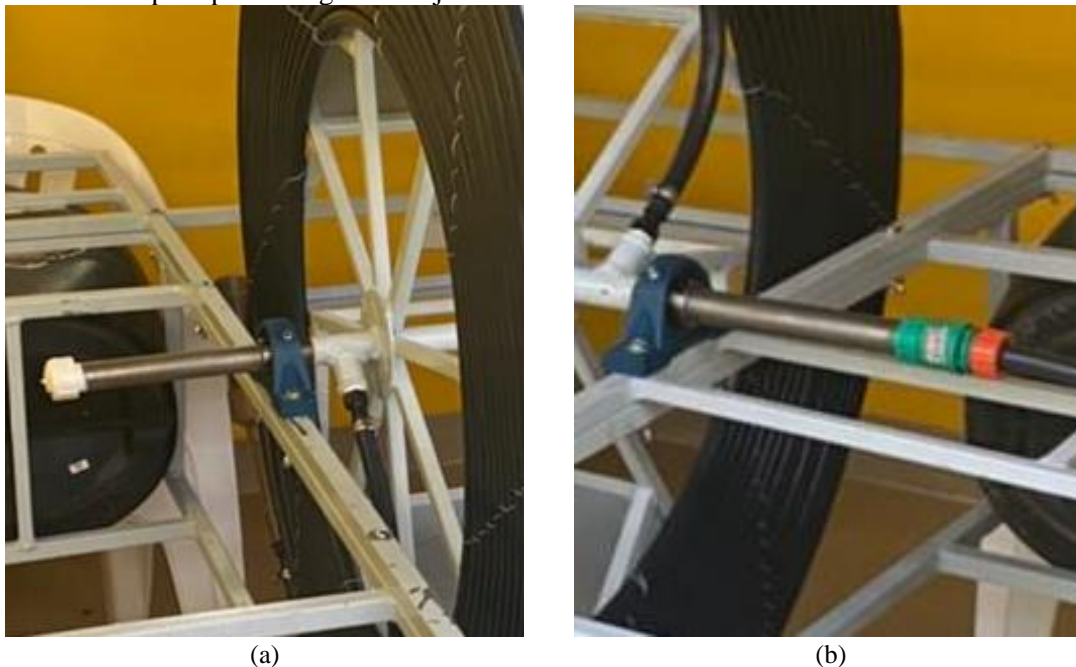
Figura 15 – Montagem da espiral.



Após a montagem e fixação das espirais no rotor da roda d'água, uma das extremidades do eixo foi vedada com um tampão de PVC (Figura 16.a). Na outra extremidade do eixo foi conectado um adaptador de engate rápido para mangueira de jardim (Figura 16.b), no intuito de evitar que o movimento giratório do eixo fosse transmitido à tubulação de recalque. O engate rápido foi a primeira alternativa utilizada

como junta rotativa, tendo em vista seu baixo custo e praticidade de montagem e substituição.

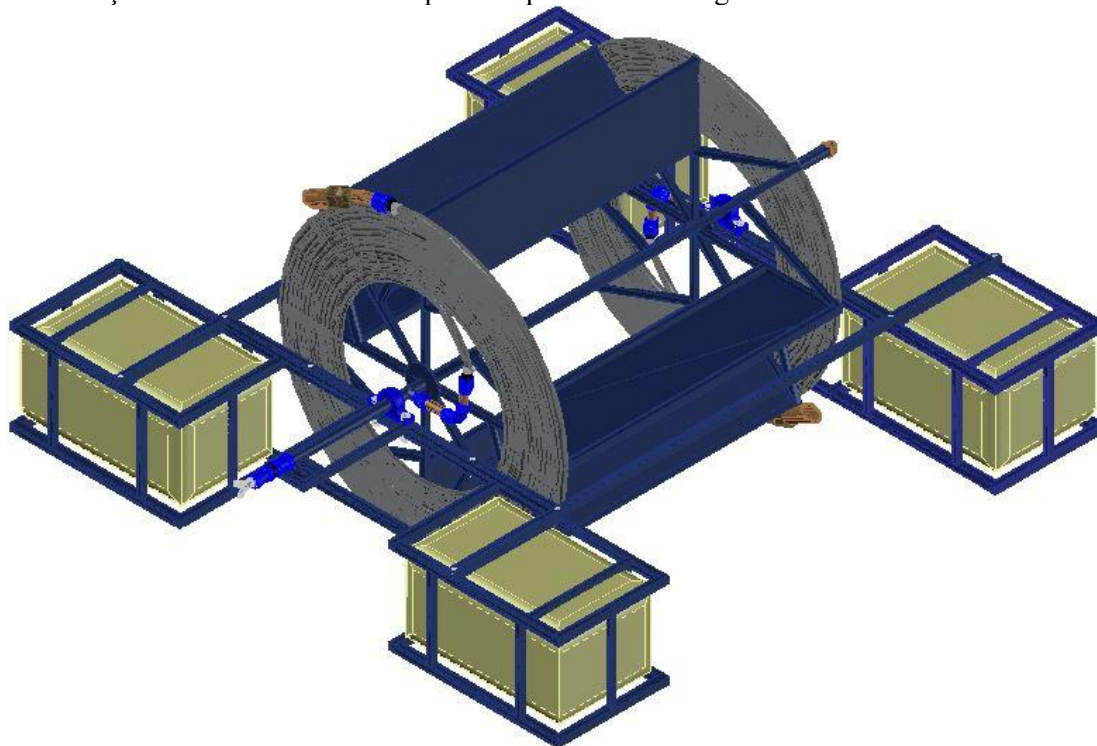
Figura 16 – Conexões nas extremidades do eixo do rotor da roda d'água: (a) tampão e (b) engate rápido para mangueira de jardim.



A instalação do equipamento foi realizada em uma propriedade particular situada às margens do rio de Ondas, no Povoado de Sucuriuzinho, no município de Barreiras, BA. O conjunto foi desmontado e transportado para o local de instalação, sendo dada especial atenção à acomodação do rotor durante o transporte, de modo a não danificar as espirais fixadas nas suas laterais. A montagem do equipamento foi realizada no local de instalação, iniciando-se pela união das três partes da estrutura da roda d'água e instalação dos flutuadores. Em seguida, a estrutura foi colocada na água para facilitar a montagem do rotor, que foi fixado à estrutura por meio dos mancais.

Na Figura 17 é apresentada uma ilustração do conjunto devidamente montado, com as espirais fixadas nas laterais do rotor e este, por sua vez, fixado à estrutura flutuante por meio dos mancais.

Figura 17 – Ilustração da bomba de bobina espiral acoplada à roda d'água flutuante.



4.2 QUANTIFICAÇÃO DOS CUSTOS DE CONSTRUÇÃO DA BOMBA ESPIRAL

Foram obtidos os custos de fabricação da bomba espiral, incluindo os custos com material de consumo e mão de obra. Para tanto, realizou-se um levantamento dos preços dos materiais utilizados na fabricação da bomba, bem como dos custos dos serviços de serralheria, tornearia e corte de metais.

Os valores foram cotados em moeda brasileira (Real) na época de fabricação da bomba, correspondente ao mês de novembro do ano de 2021. Os valores também foram convertidos para Dólar Americano, com base na cotação média da moeda no mês de novembro de 2021, disponibilizada pelo Banco Central do Brasil (2022).

Para fins de comparação com os custos da bomba fabricada, foram obtidos custos de aquisição de equipamentos similares disponíveis no mercado. Assim, foi realizada pesquisa na internet para obtenção de orçamentos de bombas de pistão com vazões similares à vazão de projeto da bomba espiral, bem como de rotores de roda d'água flutuante e de estruturas flutuantes para montagem do conjunto. Quando encontrados pelo menos três orçamentos, foi obtida a média aritmética simples dos valores obtidos.

4.3 AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DA BOMBA ESPIRAL

A bomba foi instalada no dia 04/12/2021 e mantida em funcionamento para avaliação do seu desempenho. Foram realizadas medições de vazão para diferentes alturas totais de elevação, registrando-se também a velocidade de rotação da bomba. Após as avaliações quantitativas, a bomba foi mantida em funcionamento para observação de possíveis falhas nos seus componentes, bem como para avaliar a necessidade de manutenções periódicas e possíveis interrupções no fornecimento de água.

Os ensaios de medição de vazão foram realizados no dia 11/12/2021. Inicialmente, a roda d'água foi posicionada e ancorada, com auxílio de cordas e uma haste de bambu presa na parte posterior de sua estrutura. O emprego da haste foi importante para que houvesse o posicionamento angular adequado da roda d'água, de modo que o eixo do rotor ficasse ortogonal à direção do escoamento (Figura 18).

Figura 18 – Utilização de haste de bambu para o adequado posicionamento da roda d'água flutuante.

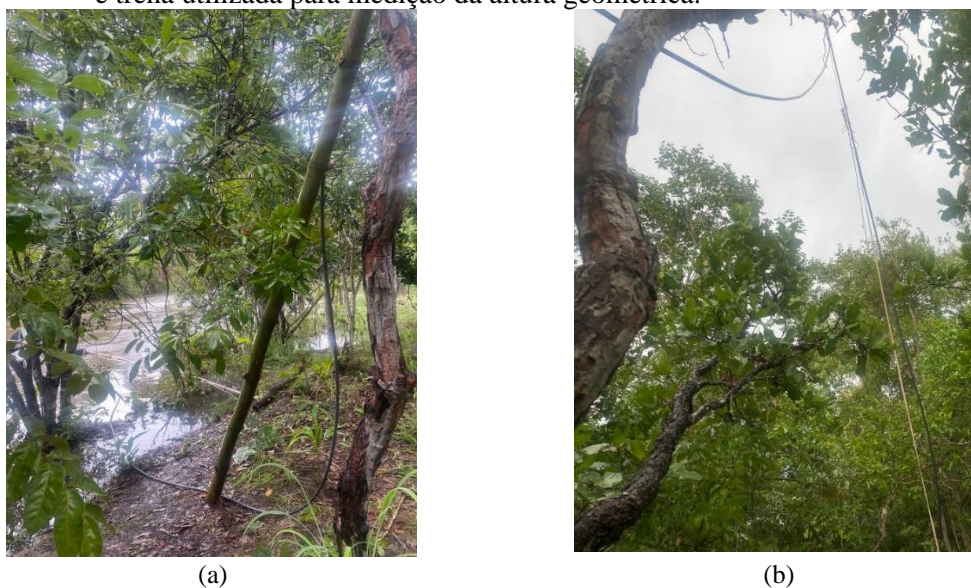


Durante os ensaios de medição de vazão, manteve-se a roda d'água na mesma posição, para evitar variações significativas na energia cinética transferida às pás do rotor. As medições foram realizadas para as seguintes alturas geométricas totais: 4, 5, 6, 7, 8, 9 e 9,6 m, em três repetições. Além da vazão fornecida pela bomba espiral, também foi determinada a sua velocidade de rotação em cada repetição.

A determinação da altura geométrica total foi realizada com auxílio de trena e mangueira de nível, de modo a obter a distância vertical entre a superfície da água do

rio no local de instalação da bomba e a altura máxima atingida pela tubulação de recalque. Esta, por sua vez, foi posicionada a diferentes alturas com auxílio de uma haste de bambu de aproximadamente 10 m de altura, conforme pode ser visualizado na Figura 19. O comprimento total da tubulação de recalque foi mantido em aproximadamente 25 metros durante todos os testes.

Figura 19 – Posicionamento da tubulação de recalque durante os ensaios de medição de vazão: (a) haste de bambu e tubulação de recalque em detalhe e (b) tubulação de recalque e trena utilizada para medição da altura geométrica.



A vazão foi obtida pelo método direto, sendo o volume recalcado pela bomba espiral conduzido para um recipiente e transferido para uma proveta graduada em ml com auxílio de funil e copo Becker de 1 L (Figura 20).

Figura 20 – Material utilizado para determinação do volume recalcado pela bomba espiral.



Ao final dos testes, foi realizada a medição da velocidade da corrente a aproximadamente 0,14 m de profundidade, correspondente à metade da altura das pás do rotor. A velocidade foi obtida com um molinete fluviométrico para medição de velocidade em rios de grande porte, marca JCTM, modelo MLN-7 (Figura 21.a). Após o posicionamento do molinete com auxílio de uma haste metálica, mediu-se o número de rotações da hélice com um contador de pulsos (Figura 21.b), em três repetições e se calculou a sua velocidade de rotação. Em seguida, foi obtida a velocidade da corrente (v), utilizando-se a equação de calibração fornecida pelo fabricante:

$$v = -0,00613007 + (0,28497408 n)$$

em que:

v – velocidade da corrente (m s^{-1});

n – velocidade de rotação da hélice do molinete (rps).

Figura 21 – Medição da velocidade da corrente: (a) molinete fluviométrico sendo posicionado e (b) contador de pulsos utilizado para determinação da velocidade de rotação da hélice.



(a)



(b)

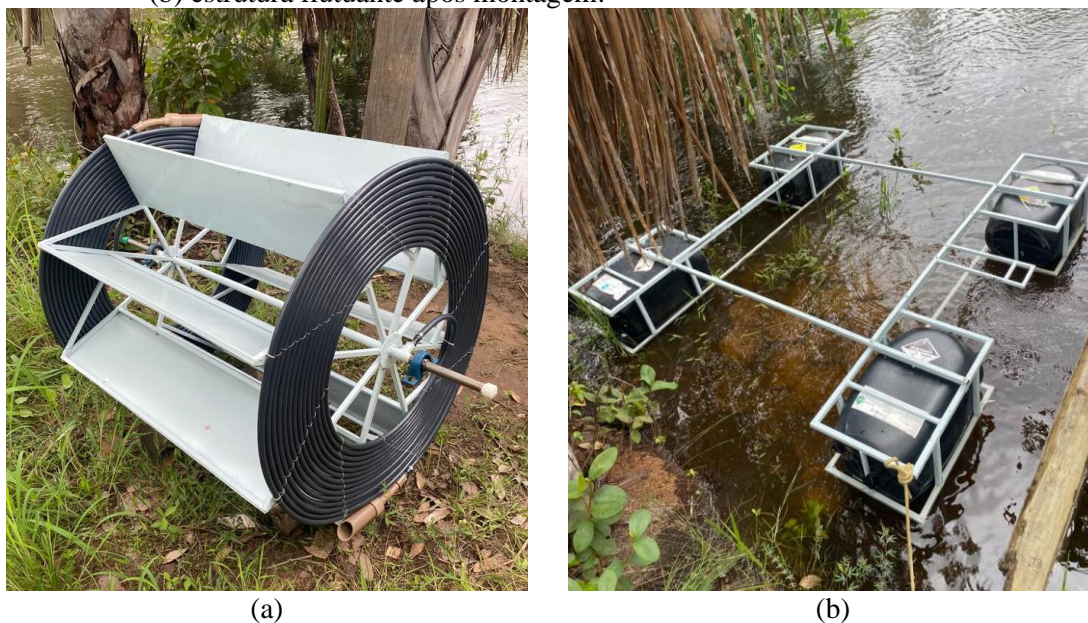
A avaliação qualitativa da bomba espiral foi realizada durante sete meses ininterruptos, desde a instalação da bomba, com visitas periódicas ao local de instalação para observação do funcionamento do equipamento, do seu estado de conservação e da integridade dos seus componentes.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 EQUIPAMENTO DESENVOLVIDO

A bomba de bobina espiral foi desenvolvida para ser acionada por uma roda d'água flutuante, cuja estrutura foi projetada em módulos, o que facilitou o transporte do equipamento. O procedimento de montagem da estrutura e do rotor mostrou-se bastante simples, permitindo a rápida instalação do equipamento no curso d'água. Na Figura 22, apresentam-se as duas espirais acopladas ao rotor da roda d'água e a estrutura da roda d'água com os flutuadores, durante o procedimento de montagem no local de instalação.

Figura 22 – Componentes da bomba espiral: (a) rotor da roda d'água com espirais acopladas e (b) estrutura flutuante após montagem.



Na Figura 23, apresenta-se a bomba de bobina espiral acoplada à roda d'água em operação, após montagem e instalação em um trecho do rio de Ondas, no povoado de Sucuriuzinho, município de Barreiras, BA.

Figura 23 – Bomba espiral acoplada à roda d'água flutuante instalada no rio de Ondas.



Devido à concepção e ao funcionamento relativamente simples da bomba espiral, não foram observados problemas durante a sua instalação. A maior dificuldade foi realizar o devido posicionamento do equipamento no curso d'água apenas com cordas presas a árvores situadas na margem do rio. Essa dificuldade foi superada utilizando-se uma haste de bambu presa à estrutura da roda d'água (Figura 24), o que possibilitou, em combinação com a ancoragem por meio de cordas, o posicionamento adequado do equipamento e, conseqüentemente, o melhor aproveitamento da energia cinética do escoamento.

Figura 24 – Posicionamento da roda d'água flutuante com auxílio de haste de bambu.



A bomba de bobina espiral desenvolvida foi projetada para alcançar uma altura total de elevação de 9,6 m, com diâmetro externo da primeira volta das espirais de 1,06 m, o que resultou em espirais com 14 voltas. Nessas condições, a vazão teórica a ser fornecida pela bomba, calculada considerando-se a soma das vazões das duas espirais, foi de 3.040 L dia⁻¹ a 5 rpm.

Ainda que tenha sido baseada, em grande parte, nos critérios de projeto definidos por Tailer (1986), o equipamento desenvolvido diferenciou-se da bomba espiral avaliada naquele trabalho em alguns aspectos, principalmente por ser acionada por uma roda d'água e por dispor de duas espirais situadas lateralmente, o que possibilitou a duplicação da vazão teórica fornecida pela bomba.

A água recalçada pela bomba vem sendo empregada para pequenas irrigações no local, abastecendo uma caixa d'água de 1000 L de forma contínua. Para evitar desperdício de água, o excesso de água é redirecionado para o rio por meio de um extravasor instalado na caixa d'água, o qual é conectado a uma mangueira que conduz a água de volta ao rio. Assim como a bomba de bobina desenvolvida por Quiroga *et al.* (2019), o equipamento desenvolvido mostrou-se aplicável para bombeamento de água em pequenas propriedades rurais, tratando-se de uma opção mais acessível no quesito econômico em comparação com uma bomba acionada por energia elétrica ou combustíveis fósseis. Além disso, o fato de ser autopropelida e não necessitar de fonte de energia externa reduz os impactos ambientais no bombeamento de água.

5.2 CUSTO DE CONSTRUÇÃO DA BOMBA ESPIRAL

Os custos com os principais materiais de consumo e com a mão de obra utilizados na fabricação da bomba de bobina espiral são apresentados na Tabela 1, em reais e em dólar americano. Os custos englobam a construção da roda d'água flutuante e a bomba espiral propriamente dita.

Tabela 1 – Custo de aquisição do material de consumo utilizado na fabricação da bomba de bobina espiral acoplada à roda d'água flutuante (valores referentes ao mês de novembro de 2021).

Material de consumo	Unidade	Preço unitário	Qty.	Total (R\$)	Total (US\$)
Metalon aço galvanizado 15 x 15 mm - chapa 18	barra de 6 m	R\$57,89	7	R\$405,20	US\$72,88
Metalon aço galvanizado 20 x 20 mm - chapa 18	barra de 6 m	R\$72,46	5	R\$362,30	US\$ 65,16
Parafusos sextavados de aço	unidade		16	R\$22,08	US\$3,97

galvanizado 6 x 50 mm		R\$1,38			
Porca do tipo borboleta de aço galvanizado 6 mm	unidade	R\$0,88	16	R\$14,08	US\$2,53
Arruelas lisas de aço galvanizado 3/4"	unidade	R\$0,85	32	R\$27,20	US\$4,89
Tubo aço galvanizado 25 mm	barra de 6 m	R\$156,00	0,5	R\$78,00	US\$14,03
Luva de aço galvanizado com rosca interna 3/4"	unidade	R\$10,20	2	R\$ 20,40	US\$3,67
Eletrodo revestido E6013	Kg	R\$31,18	2	R\$62,36	US\$11,22
Rebite de alumínio	unidade	R\$0,48	100	R\$48,00	US\$8,63
Chapa de zinco usada 3,0 m x 1,0 m	m ²	R\$10,00	3	R\$30,00	US\$5,40
Galão plástico de 60 L	unidade	R\$30,00	4	R\$120,00	US\$21,58
Mangueira de polietileno de 1/2" x 1,5 mm	rolo de 100 m	R\$65,14	1	R\$65,14	US\$11,72
Barbante branco de poliéster	rolo de 200 g	R\$17,79	1	R\$17,79	US\$3,20
Luva de redução de PVC de 50 x 25 mm	unidade	R\$8,39	2	R\$16,78	US\$3,02
Rolamento rígido de esferas de 25 mm de diâmetro interno	unidade	R\$30,00	2	R\$60,00	US\$10,79
Mancal de ferro fundido para assentamento de rolamento	unidade	R\$37,00	2	R\$74,00	US\$13,31
Esmalte sintético para aço galvanizado	galão 3,6 L	R\$184,00	1	R\$184,00	US\$33,09
Solvente	lata de 900 mL	R\$28,72	1	R\$28,72	US\$5,17
Tampão (CAP) PVC roscável 25 mm	unidade	R\$4,00	2	R\$8,00	US\$1,44
Engate rápido para mangueira de jardim 1/2"	unidade	R\$7,83	1	R\$7,83	US\$1,41
Adaptador engate rápido para mangueira de jardim	unidade	R\$5,15	1	R\$5,15	US\$0,93
Fita veda rosca 18mm	rolo 10 m	R\$6,31	1	R\$6,31	US\$1,13
Total				R\$ 1.663,34	US\$299,16

Dentre os materiais utilizados, os perfis de aço galvanizado (metalon) compreenderam 46,1 % do custo total com material de consumo. Os materiais utilizados na pintura (esmalte sintético e solvente) também apresentaram participação considerável nos custos, com 12,8% do custo total com materiais de consumo. Apesar de a pintura ser opcional, já que a maior parte dos componentes metálicos é de aço galvanizado, sua aplicação representa uma proteção adicional que pode aumentar a vida útil do equipamento.

Os custos dos serviços necessários para construção da bomba são apresentados na Tabela 2. O maior valor demandado, correspondente a 78,9% do custo total dos serviços, foi para a realização dos serviços de serralheria, incluindo o corte e a soldagem dos componentes da estrutura e do rotor da roda d'água, bem como a sua pintura.

Tabela 2 – Custo dos serviços contratados para a fabricação da bomba de bobina espiral acoplada à roda d'água flutuante (valores referentes ao mês de novembro de 2021).

Serviços	Unidade	Preço unitário	Qty.	Total (R\$)	Total (US\$)
Serviço de torno (abertura de roscas nas extremidades do tubo de 3/4" e rebaxos para passagem dos rolamentos)	unidade	R\$60,00	2	R\$120,00	US\$21,58
Serviço de corte plasma (fabricação das bases circulares para fixação dos suportes das pás)	unidade	R\$20,00	2	R\$40,00	US\$7,19
Serviço de serralheria, incluindo pintura	unidade	R\$600,00	1	R\$600,00	US\$107,91
Total				R\$ 760,00	US\$136,69

O custo total de fabricação da bomba espiral é apresentado na Tabela 3. Foram gastos R\$ 2.423,34, equivalentes a US\$ 435,85, sendo 68,6% destinados à aquisição dos materiais e 31,4% à execução dos serviços. Esse valor é bastante inferior ao custo de aquisição de equipamentos similares disponíveis no mercado, conforme apresentado na Tabela 4. O custo de aquisição de uma bomba de pistão, com vazão fornecida similar à da bomba espiral, é superior a R\$ 3.500,00, enquanto o custo de um rotor de 1,65 m de diâmetro supera os R\$ 3.000,00. O custo da estrutura flutuante da roda d'água não foi encontrado, mas pode encarecer significativamente o conjunto. Ressalta-se que foi encontrado apenas um fabricante de rotor de roda d'água flutuante (Rochfer) e apenas um orçamento na internet.

Tabela 3 – Custo total de fabricação da bomba de bobina espiral acoplada à roda d'água flutuante (valores referentes ao mês de novembro de 2021).

Item	Total (R\$)	Total (US\$)
Material de consumo	R\$ 1.663,34	US\$ 299,16
Serviços	R\$ 760,00	US\$ 136,69
Total Geral	R\$ 2.423,34	US\$435,85

Tabela 4- Custo médio de bomba de pistão e rotor de roda d'água flutuante industrial (valores referentes ao mês de julho de 2022.)

Item	Valor	Valor médio
Bomba de Roda d'água Rochfer MS Ultra-42	R\$ 4263,25	R\$ 3545,47
Bomba ZM-44 Maxxi	R\$ 3685,24	
Bomba ZM-44	R\$ 2687,92	
Rotor de roda d'água Rochfer 1,65x048 m – Pás planas	R\$ 3144,00	R\$ 3144,00
Estrutura flutuante para roda d'água	-	-

Ainda que as bombas de pistão se destaquem pelas altas alturas manométricas atingidas, da ordem de 200 m.c.a, nos casos em que alturas manométricas menores são exigidas, a bomba espiral apresenta-se como uma opção de custo bastante inferior.

5.3 AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DA BOMBA ESPIRAL

Durante os sete meses em que foi mantida em funcionamento, a bomba espiral não apresentou defeitos em seus principais componentes, mantendo o bombeamento de água ininterrupto. No entanto, a junta rotativa que conecta a bomba espiral à tubulação de recalque apresentou desgaste excessivo após algumas semanas de uso, provocando vazamento de ar e água na conexão.

Além do problema na junta rotativa, não foram observados defeitos no sistema de rolamento nem avarias no rotor ou na estrutura flutuante, o que resumiu as manutenções à substituição da junta rotativa e ao reposicionamento da bomba em função do regime de vazões do rio de Ondas, de modo a regular a velocidade de rotação do rotor e, conseqüentemente, a vazão fornecida.

Conforme pode ser visualizado na Figura 25, o desgaste na junta rotativa ocorreu no corpo e no anel de vedação do adaptador de engate rápido fixado no eixo do rotor, possivelmente devido ao desalinhamento dos componentes do engate rápido ocasionado pela flexão da tubulação de recalque.

Figura 25 – Adaptador de engate rápido da junta rotativa da bomba espiral: (a) antes de ser instalado e (b) apresentando desgaste após algumas semanas de operação.



(a)



(b)

A primeira tentativa de resolver o problema consistiu na substituição do adaptador por um novo e na instalação de um suporte para melhor alinhamento dos componentes do engate rápido, confeccionado com tubo de PVC para condução de esgoto, de 100 mm de diâmetro (Figura 26). O suporte permitiu um melhor alinhamento do engate rápido, mas o vazamento persistiu.

Figura 26 – Suporte confeccionado com tubo de PVC para alinhamento dos componentes do engate rápido.



A segunda tentativa consistiu na substituição do sistema de engate rápido, realizando a junção do eixo rotativo com a tubulação estacionária por meio do corpo de um aspersor utilizado para irrigação, que possui um sistema rotativo para permitir o movimento giratório do jato de água. O aspersor foi adaptado artesanalmente, excluindo-se os componentes desnecessários e realizando a vedação de uma das duas saídas de água existentes (Figura 27).

Figura 27 – Aspersor de irrigação adaptado para operar como junta rotativa da bomba espiral.

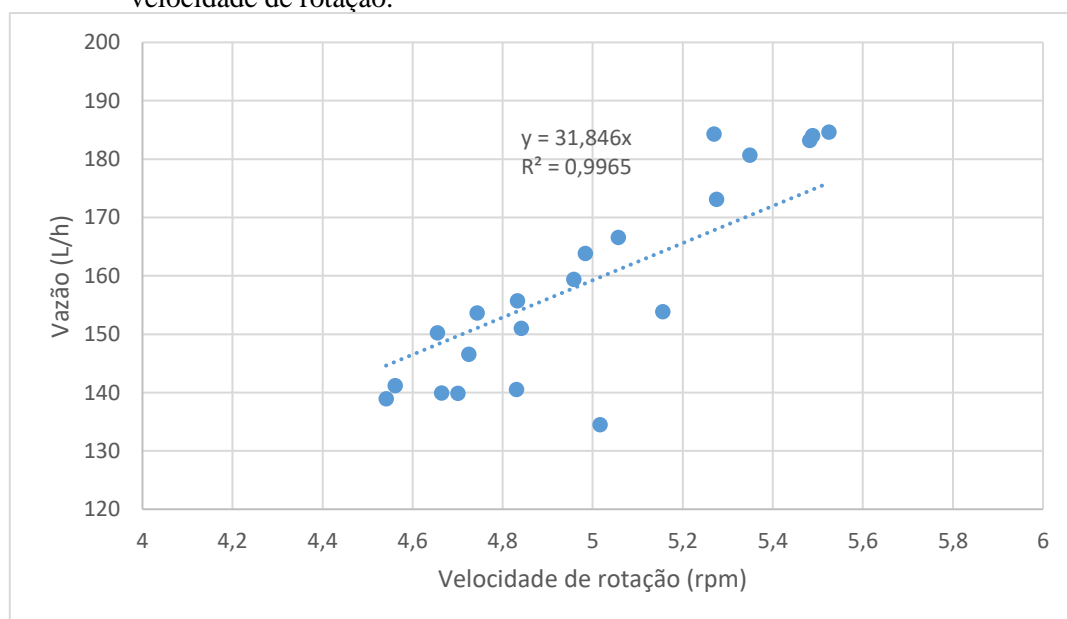


Após a substituição da junta rotativa, não foram verificados novos problemas de desgaste no componente. No entanto, esporadicamente foram observados vazamentos nessa conexão, geralmente para baixas velocidades de rotação da bomba. Ajustando-se a posição da roda d'água no rio para submeter o rotor a uma maior velocidade de rotação, o problema foi sanado. Acredita-se que o vazamento ocorre quando a pressão interna no sistema é baixa, visto que o aspersor utilizado para confecção da junta rotativa é recomendado para pressões de serviço relativamente altas, acima de 20 m.c.a.

A necessidade de utilização de uma junta rotativa com boa estanqueidade foi observada por Tailer (1986) e Morgan (1984), que a consideram um componente crítico do sistema. Ainda que tenham sido obtidos bons resultados com a adaptação de um aspersor para tal função, outras alternativas podem ser interessantes para evitar vazamentos em condições de baixa velocidade de rotação.

Quanto à avaliação da vazão fornecida pela bomba, foi possível verificar, com os ensaios realizados, que o aumento na velocidade de rotação ocasiona aumento na vazão. Esse comportamento pode ser visualizado no gráfico apresentado na Figura 28, que reúne os resultados dos ensaios realizados. Cabe ressaltar que no ajuste da linha de tendência fixou-se o ponto de coordenada (0,0), tendo em vista que pela equação 13 a vazão é diretamente proporcional à frequência de rotação da bomba e quando a frequência é nula a vazão também é nula. De fato, Quiroga *et al.* (2019) explicam que a vazão fornecida pela bomba aumenta com o aumento da sua velocidade de rotação.

Figura 28 – Comportamento da vazão fornecida pela bomba espiral em função da sua velocidade de rotação.



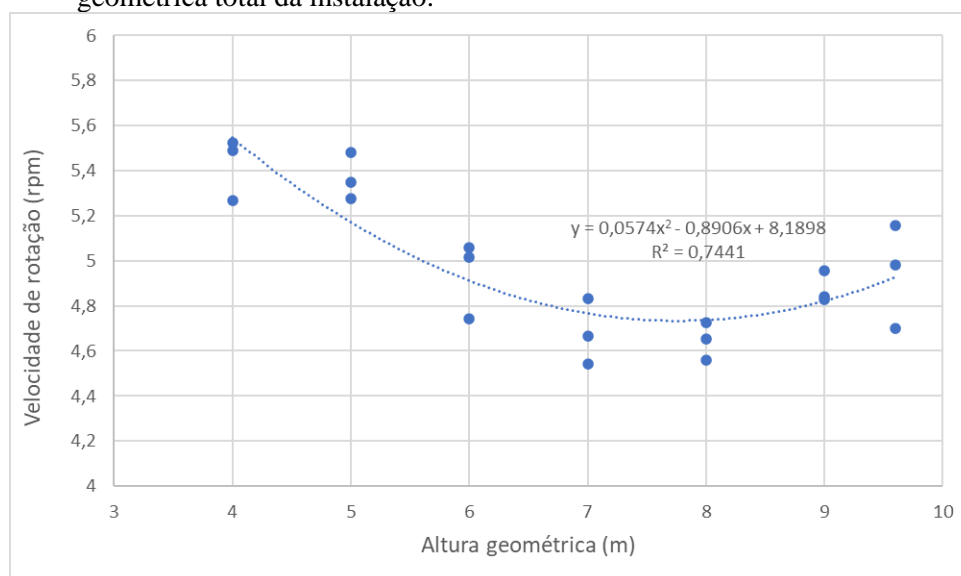
Os resultados obtidos indicaram que a bomba espiral pode fornecer vazões da ordem de 160 L h^{-1} (3.840 L dia^{-1}) operando a 5 rpm (Figura 28). Esse valor é superior à 3040 L dia^{-1} , vazão de projeto calculada para essa mesma velocidade de rotação, indicando que o volume coletado pela bomba espiral, a cada volta, é superior ao valor estipulado em projeto.

No projeto da bomba, considerou-se que o volume das colunas de água seria igual à metade do volume interno da primeira volta da mangueira, conforme pressuposição de Tailer (1986) mas, segundo Deane & Bevan (2018) e Quiroga *et al.* (2019), o comprimento da primeira coluna de água e, por conseguinte, a vazão, pode ser alterado variando a profundidade de submersão da bobina. Entretanto, não foi possível comprovar que o aumento da vazão ocorreu devido a uma variação favorável na profundidade de submersão da bomba porque os ensaios realizados não contemplaram diferentes profundidades de submersão.

Durante os ensaios realizados, a velocidade do escoamento na região onde o rotor da roda d'água estava posicionado foi da ordem de $0,44 \text{ m s}^{-1}$. Como a roda d'água foi mantida na mesma posição, e devido a existência de uma estaca para auxiliar na medição da altura geométrica, foi possível observar que a vazão do rio de Ondas não variou significativamente durante os ensaios, logo é possível afirmar que a variação na velocidade de rotação do rotor ocorreu por fatores externos. Um deles foi a influência do vento sobre as pás do rotor, tendo em vista que no dia em que os ensaios foram realizados houve constante variação na velocidade do vento e visível redução na velocidade de rotação da bomba quando o vento se intensificava.

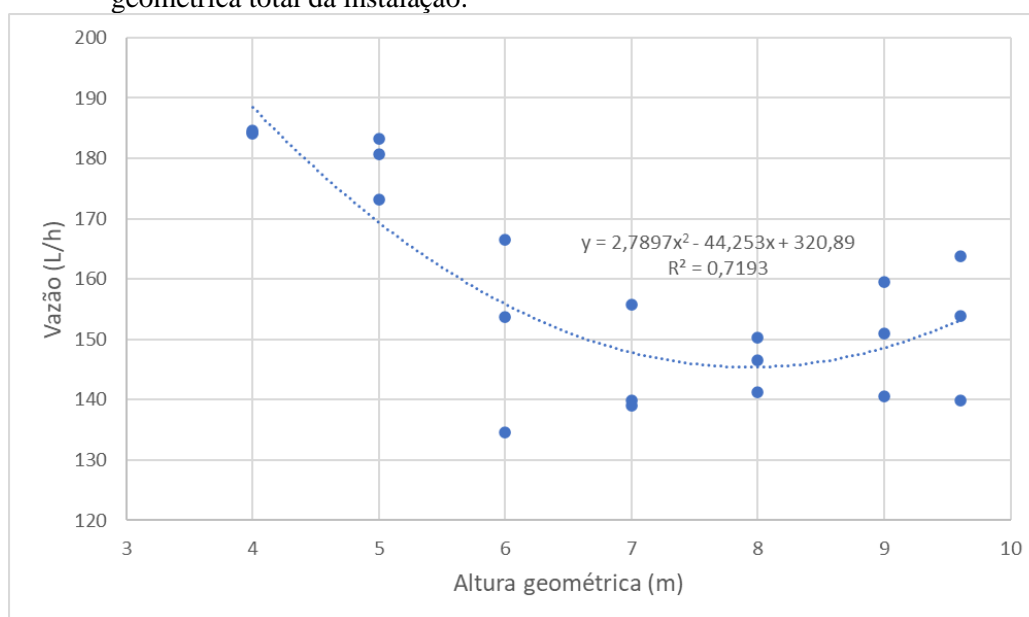
Outro fator que pode ter influenciado na variação da velocidade de rotação do rotor da roda d'água foi a variação na altura geométrica total da instalação. Conforme pode ser visualizado na Figura 29, houve uma tendência de redução na velocidade de rotação com o aumento da altura geométrica, para alturas geométricas de 4 a 7 m. No entanto, a tendência se inverteu para alturas geométricas superiores a 8 m.

Figura 29 – Comportamento da velocidade de rotação da bomba espiral em função da altura geométrica total da instalação.



A variação na altura geométrica total também ocasionou alterações na vazão fornecida pela bomba espiral, conforme pode ser visualizado na Figura 30. Da mesma forma como observado para a velocidade de rotação da bomba, houve uma tendência de redução na vazão com o aumento da altura geométrica, para alturas geométricas de 4 a 7 m, com inversão dessa tendência para alturas geométricas superiores a 8 m.

Figura 30 – Comportamento da vazão fornecida pela bomba espiral em função da altura geométrica total da instalação.



De acordo com Henn (2001), bombas de deslocamento positivo recalcam uma quantidade definida e praticamente invariável de líquido, independentemente da pressão do sistema, para uma mesma velocidade de rotação do motor de acionamento. Isso indica que a variação na altura geométrica, por si só, não deveria afetar a vazão fornecida pela bomba espiral. Nesse sentido, Quiroga *et al.* (2019), explicam que a vazão fornecida pela bomba é afetada pela velocidade de rotação, mas que a variação na velocidade de rotação não afeta a pressão de saída.

Por outro lado, Quiroga *et al.* (2019) afirmam que o torque necessário para o movimento das pás da roda d'água aumenta com o aumento da pressão de saída da bomba, o que sugere que um aumento na altura geométrica total causa aumento no torque necessário. Como a energia cinética disponível para o movimento das pás do rotor não varia, visto que a velocidade do escoamento pode ser considerada constante, o aumento no torque necessário para o movimento das pás da roda d'água pode ter ocasionado a redução da velocidade de rotação da bomba e, conseqüentemente, da vazão fornecida. Entretanto, tal suposição só poderá ser comprovada com a realização de novos ensaios, mais abrangentes, que contemplem uma faixa mais ampla de velocidades de rotação e de alturas geométricas totais.

Além do que foi exposto, é importante frisar que durante os ensaios pode ter havido pequenas variações na perda de carga na tubulação de recalque, uma vez que, apesar de seu comprimento ter permanecido constante, a sua posição variou com a alteração da altura geométrica total, causando eventualmente curvaturas na mangueira. Por tratar-se de uma mangueira de polietileno, a tubulação de recalque esteve mais esticada ou mais enrolada a depender da altura geométrica. Essa variação na perda de carga pode ter contribuído para aumentar o erro experimental.

Ainda em relação ao gráfico apresentado na Figura 30, é importante salientar que a bomba espiral forneceu vazões da ordem de 150 L h^{-1} (3.600 L dia^{-1}) para uma altura geométrica de 9,6 m. Isso evidencia que a bomba atendeu às especificações de projeto, atingindo a altura total de elevação desejada e superando em quase 20% a vazão projetada.

Apesar de a bomba ter atingido a altura total de elevação prevista em projeto, acredita-se que poderá recalcar água a alturas ainda maiores, tendo em vista o fenômeno de *air lift*, apontado por Tailer (1986) e Deane & Bevan (2018), que consiste na presença de colunas de ar e água, de forma alternada, na tubulação de recalque, ocasionada pela alternância da coleta de ar e água na entrada da bomba. As colunas de

ar presentes na tubulação causam redução do peso total de fluido elevado, tendo em vista que o peso específico do ar é muito menor do que o da água. Sendo assim, novos ensaios são recomendados para verificar a influência desse fenômeno sobre a altura total de elevação da bomba.

6 CONCLUSÕES

Essa pesquisa visou desenvolver uma bomba espiral de baixo custo para recalque de água em cursos d'água com baixa velocidade de escoamento. O intuito não se limitou ao desenvolvimento de uma bomba a fim de economizar, mas ainda de contribuir com a literatura nacional, tanto escassa para essa temática.

Assim, a bomba foi projetada e instalada em curso de água com uma baixa velocidade de escoamento, apresentando um bom funcionamento durante os sete meses que está em uso, não demonstrando qualquer problema considerável de funcionamento e comprovando assim que a mesma funciona em cursos d'água de velocidade menor que 0,6 m/s.

Foi possível desenvolver a bomba garantindo um baixo custo de investimento. No total, foram gastos R\$ 2.423,34, considerando os materiais e serviços demandados.

Quanto à avaliação de desempenho da bomba espiral, constatou-se que esta atingiu a altura total de elevação projetada e foi capaz de fornecer uma vazão superior à de projeto. No entanto, o comportamento da vazão com a variação na altura geométrica total apresenta discrepâncias com a literatura, evidenciando a necessidade de realização de novos ensaios para melhor compreensão do funcionamento da bomba.

Como recomendações para trabalhos futuros, sugere-se a ampliação das faixas de velocidades de rotação e alturas geométricas totais avaliadas, bem como a medição da pressão na saída da bomba. Além disso, sugere-se que os ensaios sejam realizados apenas quando a velocidade do vento for reduzida, e que a determinação da velocidade do escoamento seja realizada em cada medição de vazão.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVARENGA, A. C.; FERREIRA, V. H.; FORTES, M. Z. Energia solar fotovoltaica: uma aplicação na irrigação da agricultura familiar. **Sinergia**, v. 15, n. 4, p. 311-318, 2014.

AZEVEDO NETTO, J. M.; ARAÚJO, R.; FERNANDEZ, M. F.; ITO, A. E. **Manual de Hidráulica**. 8. Ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2003.

BANCO CENTRAL DO BRASIL. **Cotação e boletins**. Disponível em: <<https://www.bcb.gov.br/estabilidadefinanceira/historicocotacoes>> Acesso em: 01/07/2022.

BRASIL, A. N. **Máquinas Termohidráulicas de Fluxo**. 2006. Disponível em: http://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/TM120/APOSTILA_MH/capitulo2_teorialgeral__M_AQUINAS%20DE%20FLUXO.PDF. Acesso em: 10 mar. 2022.

BRASIL, A. N. 3. **Bombas - classificação e descrição**. (2010). Disponível em: https://sistemas.eel.usp.br/docentes/arquivos/5817712/LOQ4015/capitulo3_bombasclasificacaoedescricao.pdf. Acesso em: 10 mar. 2022.

CANAL BOMBAS. **Roda d'água**. Disponível em: <https://loja.canalbombas.com.br/roda-d-agua-1-65-x-0-48-m-pas-planas-03-150-121>. Acesso em: 26 jul. 2022.

DAL BEM, J. C. T. **Solução para bombeamento de água em propriedades rurais utilizando energia solar fotovoltaica**. Revista Brasileira de Energia Solar Ano 7 Volume VII Número 1 Julho de 2016 p.50-57.

DEANE, J. H. B.; BEVAN, J. J. A hydrostatic model of the Wirtz pump. **Proceedings of the Royal Society A**, v. 474, n. 2211, 2018.

DENÍCULI, W.; SILVA, D.D.; OLIVEIRA, R.A. **Hidráulica de condutos perfurados**. 1 ed. Viçosa: Editora UFV, 2002.

FOUST, A. S. et al. **Princípios das operações unitárias**. Traduzido por Horacio Macedo. 2. ed. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, c1982.

FRAENKEL, P. K. **FAO irrigation and drainage paper 43: water lifting devices**. Roma: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1986.

GONÇALVES, R. D., ENGELBRECHT, B. Z., CHANG, H. K. Análise hidrológica de séries históricas da bacia do rio Grande (BA): contribuição do Sistema Aquífero Urucuia. **Águas Subterrâneas**, v. 30, n. 2, 2016.

HENN, E. A. L. **Máquina de fluido**. 2 ed. Santa Maria: Ed. UFSM, 2001.

KHANAL, P.; ACHARYA, S.; SHRESTHA, M.; CHITRAKAR, S.; NEOPANE, H. P. Design, fabrication and testing of river water pump for rural communities. **Kathmandu University Journal of Science, Engineering and Technology**, v. 15, n. 2, 2021.

LINSINGEN, I. V. **Fundamentos de sistemas hidráulicos**. Editora UFSC. 2003.

LOGAN JR, E.; ROY, R.; KADAMBI, V. Chapter 1: Introduction. In: LOGAN JR, E.; ROY, R. (eds). **Handbook of turbomachinery**. 2 ed. New York: Marcel Dekker, Inc., 2003.

LOJA DO MECÂNICO. **Bomba de água para alturas elevadas**. Disponível em: <https://www.lojadomecanico.com.br/produto/143346/33/619/bomba-d-agua-para-alturas-elevadas-ate-12-km-zm-44-zm-bombas-5060102->. Acesso em: 26 jul. 2022.

LOJA ZM. **Bomba avulsa**. Disponível em: <https://www.lojazm.com.br/produto/bomba-avulsa-zm-44>. Acesso em: 26 jul. 2022.

MACINTYRE, A. J. **Bombas e Instalações de Bombeamento**. 2 ed. rev. Rio de Janeiro: LTC, 1997. 782 p.

MACINTYRE, A. J. **Máquinas motrizes hidráulicas**. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1983. 649 p.

MERITO COMERCIAL. **Bomba de roda d'água rochfer ms ultra-42**. Disponível em: https://www.meritocomercial.com.br/bomba-de-roda-dagua-rochfer-ms-ultra-42-4001001007326-p1030727?tsid=42&gclid=cj0kcqjwof6wbhd4arisaoi65ah3imd8jpgpxojuemywkbzpgsaf aavf18ntfktnn9ycjqpw1s8o7iaaraqalw_wcb. Acesso em: 26 jul. 2022.

MOREIRA, M. C; SILVA, D. D. **Atlas hidrológico da bacia hidrográfica do Rio Grande**. Barreiras: Gazeta Santa Cruz, 2010.

MORGAN, P. A spiral tube water wheel pump. **Blair Research Bulletin**, 1984.

MORTIMER, G. H.; ANNABLE, R. The coil pump: theory and practice. **Journal of Hydraulic Research**, v. 22, n. 1, 1984, pp. 9–22.

MÜLLER, G.; DENCHFIELD, S.; MARTH, R.; SHELMERDINE, B. Stream wheels for applications in shallow and deep water. In: IAHR WORLD CONGRESS, 32., 2007, Venice, Italy. **Proceedings...** Venice, Italy: International Association for Hydro-Environment Engineering and Research, 2007.

MÜLLER, G.; KAUPPERT, K. Performance characteristics of water wheels. **Journal of Hydraulic Research**, v. 42, n. 5, 2004, pp. 451–460.

QUARANTA, E. Stream water wheels as renewable energy supply in flowing water: Theoretical considerations, performance assessment and design recommendations. **Energy for Sustainable Development**, v. 45, 2018, pp. 96-109.

QUARANTA, E.; FONTAN, S.; CAVAGNERO, P.; REVELLI, R. Efficiency of traditional water wheels. In: IAHR WORLD CONGRESS, 36., 2015, Hague, the Netherlands. **Proceedings...** Hague, the Netherlands: International Association for Hydro-Environment Engineering and Research, 2015.

QUIROGA, J.; TSCHIERSCH, K.; BOHÓRQUEZ, O. Coil pump design as an object of meaningful learning. **Journal of Physics: Conference Series**, v. 1161, 012027, 2019.

PATIL, N. R.; GAIKWAD, S. R.; NAVALE, R. A.; SONAWANE, D. S. Design, Manufacturing and Performance Analysis of Spiral Coil Pump. **Applied Mechanics and Materials**, v. 446-447, 2014, pp. 549-552.

PORTO, R. M. **Hidráulica básica**. 4 ed. São Carlos: EESC/USP, 2006. 540 p.

RAMOS, R. A. V.; SILVA, J. B. C. **Máquinas hidráulicas e térmicas**. Universidade Estadual Paulista. Faculdade De Engenharia Mecânica. Departamento De Engenharia Mecânica. Ilha Solteira. 2009.

TAILER, P. **The spiral pump**: a high lift, slow turning pump. Disponível em: <<https://lurkertech.com/water/pump/tailer/>> Acesso em: 20/03/2022.

TEVATAA, A.; INPRASIT, C. The Effect of Paddle Number and Immersed Radius Ratio on Water Wheel Performance. **Energy Procedia**, v. 9, 2011, pp. 359-365.

ZHAO, M.; ZHENG, Y.; YANG, C.; ZHANG, Y.; TANG, Q. Performance Investigation of the Immersed Depth Effects on a Water Wheel Using Experimental and Numerical Analyses. **Water**, v. 12, n. 4, 2020.