

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA POLITÉCNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

GABRIEL KIMITO KIYOHARA

Desassoreador eólico-solar com captação autônoma de energia

São Paulo

2023

GABRIEL KIMITO KIYOHARA

Desassoreador eólico-solar com captação autônoma de energia

Versão Corrigida

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo para obtenção do título de
Mestre em Ciências.

Área de Concentração: Engenharia de
Controle e Automação Mecânica

Orientador: Prof. Dr. Demetrio Cornilios
Zachariadis

São Paulo

2023

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Catálogo-na-publicação

Kiyohara, Gabriel Kimito
Desassoreador eólico-solar com captação autônoma de energia /
G. K.Kiyohara -- São Paulo, 2023.
90 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecânica.

1.Assoreamento 2.Desassoreamento 3.Energia eólica 4.Energia fotovoltaica I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecânica II.t.

GABRIEL KIMITO KIYOHARA

Desassoreador eólico-solar com captação autônoma de energia

Versão Corrigida

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo para obtenção do título de
Mestre em Ciências.

São Paulo

2023

Nome: KIYOHARA, Gabriel Kimito

Título Desassoreador eólico-solar com captação autônoma de energia

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Ciências.

Aprovado em: 16/06/2023

Banca Examinadora

Prof(a). Dr(a).

Demétrio C. Zacharias

Instituição

EPUSP - PME

Julgamento:

Aprovado

Prof(a). Dr(a).

José Carlos Pierzwa

Instituição

EPUSP - PHA

Julgamento:

Aprovado.

Prof(a). Dr(a).

JOÃO DE SÃO BRASIL LIMA

Instituição

CEUN - IMT

Julgamento:

Aprovado

AGRADECIMENTOS

À minha família, por me dar a estabilidade necessária nos momentos conturbados que atravessamos para chegar aqui.

Aos co-inventores Dr. Demetrio e Mauro, por terem achado essa ideia não tão absurda e fazerem com que ela não ficasse esquecida no limbo.

Ao colega Dr. Julio Romel, pelas orientações na parte eletrônica e tecnologia fotovoltaica, sobre as quais ainda tenho muito o que aprender.

Aos meus amigos e colegas, que ora criticaram o que não entenderam do texto, ora me lembraram de que precisava terminar logo este trabalho, e que às vezes é bom parar e interagir com gente e dar risadas.

Aos amigos do Projeto Fênix, que conheci na mesma época em que iniciei este projeto. Sem esse pessoal, eu teria desistido muito antes de terminar esta dissertação.

O autor agradece ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (Cnpq) pelo apoio prestado na realização deste trabalho.

RESUMO

KIYOHARA, G. K. **Desassoreador eólico-solar com captação autônoma de energia.** 2023. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2023).

O assoreamento é um fenômeno que afeta a todos os corpos de água tanto naturais como artificiais, degradando-os e reduzindo seu volume útil. As técnicas atualmente empregadas em seu combate seguem uma metodologia corretiva intensiva e fazem uso de queima de combustíveis fósseis, os quais têm despertado diversas iniciativas para substituí-los por fontes diversas. Nesse contexto, o presente trabalho trata do projeto básico de um sistema de desassoreamento de reservatórios d'água cujo aporte energético é feito por aerogeradores e painéis solares. Com isso, o desassoreador tem por finalidade operar a longo prazo de forma preventiva, ao invés de realizar limpezas esporádicas emergenciais do reservatório. Informações da Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (Sabesp), sobre operações de dragagem, e dados de fabricantes de equipamentos de bombeamento foram utilizados para elaborar um modelo matemático para estimar as vazões obtidas considerando diferentes formas construtivas do sistema. Com base em dados sobre regimes eólicos e solares obtidos do Centro de Referência para as Energias Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito (CRESESB), estimou-se o desempenho anual de algumas configurações estudadas. Ao compará-lo às necessidades médias de alguns reservatórios conhecidos, foi possível dimensionar a quantidade de unidades suficientes para prevenir a perda de volume útil devido ao assoreamento. Por exemplo, uma balsa equipada com uma bomba submersível de 1cv, três painéis fotovoltaicos de 2m^2 e uma turbina de eixo vertical de 500W teria capacidade estimada de aspirar cerca de 213 m^3 por ano; para comparação, isso é mais de quatro vezes a taxa de deposição de uma lagoa de estabilização como a de Jacaré no município de Cabreúva-SP, que recebe cerca de 47m^3 de partículas sólidas por ano. Foram utilizadas extrapolações de alguns dados empíricos para completar os modelos e, diante da sensibilidade percebida, ficou evidente a necessidade de verificações experimentais para melhorar a precisão dos cálculos.

Palavras-chave: Assoreamento, Deposição de sedimentos, Desassoreamento, Energia eólica, Energia solar fotovoltaica.

ABSTRACT

KIYOHARA, G. K. **Wind-solar desilter with autonomous energy gathering**. 2023. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2023).

Silting is a phenomenon which affects all bodies of water both natural and artificial, degrading and reducing their working volume. The current techniques employed in its mitigation follow a corrective intensive method, and burn fossil fuels which are bringing up several initiatives aiming at substituting them for a variety of energy sources. In such a context, this paper presents the basic project of a desilting system for water reservoirs whose energy supply is obtained from wind turbines and solar panels. In doing so, the desilter aims for long term operation and preventive action, instead of performing sporadic emergency reservoir cleansing. Information from Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (Sabesp, São Paulo State's sanitation company), about dredging operations, and data from pumping equipment manufacturers were used to create a mathematical model to estimate the flow performed by different arrangements of the system. Based on data on the wind and solar regimen given by Centro de Referência para as Energias Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito (CRESESB) database, the annual performances for each arrangement were estimated. By comparing them with the average needs of some known reservoirs, it was possible to dimension the number of units needed to prevent the working volume losses due to silting. For example, a vessel equipped with one 1cv submersible pump, three 2m² photovoltaic panels and a 500W vertical axle windturbine would be able to collect an estimated volume of 213m³ of solid particles per year; in comparison, it is four times higher than the deposition inflow for the stabilization pond located at Jacaré in the city of Cabreúva-SP, which receives about 47m³ per year. Some empirical data were extrapolated in order to complete the models and, in face of the perceived sensibility, it became evident that further experimental verifications will be necessary to improve the calculations' precision.

Keywords: Silting, desilting, wind power, photovoltaic.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Distribuição de água doce no mundo.....	14
Figura 2 – Dados sobre seca no Brasil, de 2015 a 2017.....	15
Figura 3 – Draga de escavadeira.....	18
Figura 4 – Draga de "clamshell".....	19
Figura 5 – Draga de sucção e arrasto.....	19
Figura 6 – Draga de sucção e corte.....	20
Figura 7 – Exemplo esquemático de lagoa de estabilização.....	21
Figura 8 – Fotos de lagoa anaeróbia na cidade de Itatinga–SP.....	21
Figura 9 – Imagens de exemplo de balsa de desassoreamento alimentada por gerador a diesel (gerador fora da imagem).....	22
Figura 10 – Exemplos de aplicações de rejeitos de mineração, segundo a Samarco.....	23
Figura 11 – Embalagem semipermeável para secagem de lodo.....	23
Figura 12 – Centrífuga para secagem e caçamba de coleta de resíduos.....	24
Figura 13 – Matriz elétrica brasileira 2021.....	26
Figura 14 – Insolação média anual em plano horizontal.....	27
Figura 15 – Velocidade média anual dos ventos a 30 m de altura.....	30
Figura 16 – Exemplo de curva de potência de uma turbina eólica.....	31
Figura 17 – Concepção prévia de arranjo para o desassoreador (fora de escala).....	34
Figura 18 – Diagrama do sistema de controle e fluxo de potência no arranjo básico.....	39
Figura 19 – Diagrama de uma rede de microgeração utilizando inversor inteligente com função bidirecional.....	40
Figura 20 – Forças atuando em uma partícula depositada.....	42
Figura 21 – Diagrama de Hjulstrom.....	43
Figura 22 – Ilustração do funcionamento de um separador hidrociclone.....	44
Figura 23 – Exemplo de modelo de turbina eólica de eixo vertical e sua curva de potência.....	45
Figura 24 – Representações dos esforços para estudo da flutuabilidade e estabilidade.....	46
Figura 25 – Diagrama de esforços para estabilidade.....	47
Figura 26 – Diagrama do sistema, destacando as cotas verticais a ser vencidas.....	54
Figura 27 – Gráfico do modelo adotado para variação de concentração da mistura conforme a vazão.....	56
Figura 28 – Diagrama ilustrando a vala escavada pelo bombeamento.....	66
Figura 29 – Curva de potência de uma turbina de eixo vertical de 500 W.....	82
Figura 30 – Turbina de eixo vertical de 500 W.....	82
Figura 31 – Gráfico da energia coletada por desassoreador com 3 painéis e 1 turbina ao longo do ano.....	88
Figura 32 – Gráfico da energia coletada por desassoreador com 3 painéis com diferentes inclinações e 1 turbina ao longo do ano.....	90

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Levantamento de custos no processo de desassoreamento Mombuca 2004.....	25
Tabela 2 – Levantamento de custos no processo de desassoreamento Jacaré 2005	25
Tabela 3 – Dados de irradiação solar fornecidos pelo CRESESB para medições próximas às coordenadas da cidade universitária de São Paulo (23,55° S 46,72° O).....	28
Tabela 4 – Dados de irradiação solar fornecidos pelo CRESESB para medições em 23,5°S 46,749°O, considerando diferentes inclinações de painel solar.....	28
Tabela 5 – Fator de rugosidade n	29
Tabela 6 – Dados eólicos do CRESESB, exemplo da cidade universitária de São Paulo (coordenadas 23,55° S 46,72° O)	29
Tabela 7 – Parâmetros para estudo da estabilidade	48
Tabela 8 – Valores estimados da operação do sistema com bombas BCS 220	50
Tabela 9 – Dimensionamento da parte energética do sistema para bombas BCS 220.....	51
Tabela 10 – Valores estimados da operação do sistema com bombas BCS 475	51
Tabela 11 – Dimensionamento da parte energética do sistema para bombas BCS 475	52
Tabela 12 – Pontos selecionados para curva de variação da concentração bombeada conforme a vazão. 56	
Tabela 13 – Coeficientes do polinômio de segunda ordem da curva de concentração.....	56
Tabela 14 – Pontos de operação para diferentes arranjos, calculados conforme o segundo modelo, considerando massa específica de sólidos ρ_s 1100 kg/m ³ e profundidade h_L 5 metros.....	57
Tabela 15 – Pontos de operação para diferentes arranjos, calculados conforme o segundo modelo, considerando ρ_s 2650 kg/m ³ e profundidade h_L 5 metros	58
Tabela 16 – Pontos de operação para diferentes arranjos, calculados conforme o segundo modelo, considerando ρ_s 2650 kg/m ³ e profundidade h_L 25 metros	59
Tabela 17 – Dimensionamento de balsas conforme segundo modelo, considerando ρ_s 2650 kg/m ³ e profundidade h_L 25 metros.....	61
Tabela 18 – Dados de irradiação solar fornecidos pelo CRESESB para medições próximas às coordenadas de Quixeramobim (5,2° S 39,25° W)	62
Tabela 19 – Dados eólicos do CRESESB, exemplo de Quixeramobim (coordenadas 05°11'56" S 39°17'34" O).....	62
Tabela 20 – Dimensionamento de balsas conforme segundo modelo, considerando ρ_s 2650 kg/m ³ e profundidade h_L 25 metros e regime eólico-solar de Quixeramobim	63
Tabela 21 – Número de Reynolds para pontos de operação de diferentes arranjos, calculados conforme o segundo modelo, considerando ρ_s 1100 kg/m ³ e profundidade h_L 5 metros	65
Tabela 22 – Ângulos de repouso.....	67
Tabela 23 – Volume da vala escavada	68
Tabela 24 – Coeficientes da distribuição de Weibull do regime de ventos para coordenadas 23° 33' 34" S 46° 43' 26" O, referentes à cidade universitária da USP em São Paulo	83
Tabela 25 – Distribuição de frequências de ocorrência de velocidades do vento*	84
Tabela 26 – Cruzamento dos dados de regime de ventos e potência da turbina eólica para obtenção da potência média	85
Tabela 27 – Custo parcial dos componentes para balsa com bomba BCS 220 1cv e 50 metros de mangueira 2"	86
Tabela 28 – Dados de regime eólico e solar para coordenadas do campus São Paulo da USP (coord. 23,5°S 46,749°O)	87
Tabela 29 – Energia coletada pelo desassoreador com 3 painéis fotovoltaicos horizontais e 1 turbina eólica a cada mês.....	88
Tabela 30 – Energia total coletada pelo desassoreador com 3 painéis fotovoltaicos em diferentes inclinações e 1 turbina eólica.....	89

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AC – Corrente alternada (*alternate current*)

AESA – Agência Executiva de Gestão das Águas da Paraíba

ANA – Agência Nacional das Águas

BMS – Sistema de gerenciamento de baterias (*Battery Management System*)

Compr. – Comprimento

Conv. – Conversor

CRESESB - Centro de Referência para as Energias Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito

DBO – Demanda Biológica de Oxigênio

DC – Corrente contínua (*direct current*)

Dens. – Densidade

Dist. – Distância

EPUSP – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

Hidroc. – Hidrociclone

IPCA – Índice de Preços ao Consumidor Amplo

Incl. – Inclinação

Lat. – Latitude

Long. – Longitude

Part. - Partículas

Pot. – Potência

Qtd. – Quantidade

Sabesp – Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo

USP – Universidade de São Paulo

Vel. Ou veloc. - Velocidade

Visc. - Viscosidade

LISTA DE SÍMBOLOS

- a_B – coeficiente de segunda ordem do polinômio de estimação da curva de operação da bomba
- a_c – coeficiente de segunda ordem do polinômio de estimação de concentração de sólidos
- a_M – coeficiente de segunda ordem do polinômio de estimação da perda de carga nas mangueiras
- a_S – coeficiente de segunda ordem do polinômio de estimação da perda de carga no separador
- b_B – coeficiente de primeira ordem do polinômio de estimação da curva de operação da bomba
- b_c – coeficiente de primeira ordem do polinômio de estimação de concentração de sólidos
- b_M – coeficiente de primeira ordem do polinômio de estimação da perda de carga nas mangueiras
- b_S – coeficiente de primeira ordem do polinômio de estimação da perda de carga no separador
- c – fator de escala de uma distribuição de Weibull
- C – concentração de sólidos na mistura bombeada
- c_B – coeficiente de ordem zero do polinômio de estimação da curva de operação da bomba
- c_c – coeficiente de ordem zero do polinômio de estimação de concentração de sólidos
- c_M – coeficiente de ordem zero do polinômio de estimação da perda de carga nas mangueiras
- c_S – coeficiente de ordem zero do polinômio de estimação da perda de carga do separador
- C_D – coeficiente de arrasto
- D – diâmetro característico
- F_D – Força de arrasto
- F_E – Força de empuxo exercida sobre a plataforma flutuante
- F_P – Força peso
- g – aceleração da gravidade
- h – Altura do vertedouro da mistura bombeada em relação ao nível da água
- H – Altura acima do solo considerada para estimar velocidade do vento na turbina
- H_B – carga fornecida pela bomba à mistura movimentada
- h_L – profundidade medida entre o leito aspirado e a superfície do reservatório
- H_M – perda de carga nas mangueiras
- H_S – perda de carga no separador
- H_0 – Altura acima do solo em que foram tomadas as medidas de velocidade do vento
- I_0 – momento de inércia da planta submersa
- k – fator de forma de uma distribuição de Weibull
- l – altura da vala escavada
- L – distância entre o centro de massa da balsa e o ponto de aplicação de uma força que promove inclinação de uma embarcação
- M_{total} – Massa total estimada para o conjunto desassoreador

n – coeficiente de rugosidade

$p(V)$ – probabilidade de ocorrência da velocidade do vento V

Q – Vazão volumétrica da mistura bombeada

Q_L – Vazão volumétrica da fase líquida

Q_S – Vazão volumétrica da fase sólida

r – raio da base menor da vala escavada

R – raio da base maior da vala escavada

Re – número adimensional de Reynolds

S – área de um objeto projetada no plano ortogonal ao escoamento

U – velocidade média de um fluido

V – Velocidade do vento

V_0 – Velocidade de referência medida a uma altura H_0 acima do solo

V_H – Velocidade do vento em determinada altura H acima do solo

V_I – Volume de líquido deslocado pela imersão da balsa flutuante

α_n – coeficiente do termo de ordem n do polinômio de estimação da vazão de operação de acordo com o segundo modelo apresentado

γ - peso específico

θ – ângulo de inclinação da balsa quando atingida por vento

μ - viscosidade dinâmica

ρ – massa específica de um material

ρ_{ar} – massa específica do ar

ρ_L – massa específica da fase líquida

ρ_m – massa específica da mistura

ρ_S – massa específica da fase sólida

\forall - volume

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
1.1. Recursos hídricos e saneamento no Brasil.	14
1.2. Assoreamento.....	14
2. OBJETIVO	17
3. REVISÃO DA LITERATURA	18
3.1. Dragagem	18
3.2. Assoreamento em lagoas de estabilização.....	20
3.3. Barragens de minério.....	22
3.4. Destinação dos sedimentos	23
3.5. Energias renováveis	26
3.6. Solução proposta	32
4. METODOLOGIA	34
4.1. Sistema proposto.....	34
4.2. Modelo	36
4.2.1. Energia eólica	36
4.2.2. Energia solar	37
4.2.3. Conversão e armazenamento de energia.....	39
4.2.4. Bombeamento de líquidos.....	41
4.2.5. Bombeamento de sólidos em suspensão	41
4.2.6. Separação da mistura.....	44
5. RESULTADOS	45
5.1. Potencial energético	45
5.2. Flutuação e Estabilidade	46
5.3. Primeiro modelo	48
5.4. Segundo modelo	53
5.5. Ajustes pela disponibilidade energética	61
5.6. Turbulência e suspensão.....	64
5.7. Regime de trabalho	65
5.8. Propostas de trabalhos futuros.....	69
5.8.1. Curva de concentração.....	69
5.8.2. Evolução da operação	69
5.8.3. Vala escavada	70
5.8.4. Otimização dos arranjos.....	70
6. CONCLUSÃO	73
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	76
APÊNDICE A. Cruzamento das curvas de regime eólico e de potência de turbinas	82
APÊNDICE B. Estimativas de custos de material	86
APÊNDICE C. Variação sazonal da captação de energia	87

1. INTRODUÇÃO

1.1. Recursos hídricos e saneamento no Brasil.

Detentor de aproximadamente 12% da água doce do planeta (Figura 1), o Brasil é tido como o país com a maior reserva desse recurso no mundo, estando grande parte dela localizada na região amazônica. Estima-se que o volume disponível em território nacional seja de 8,233 trilhões de metros cúbicos (1)(2).

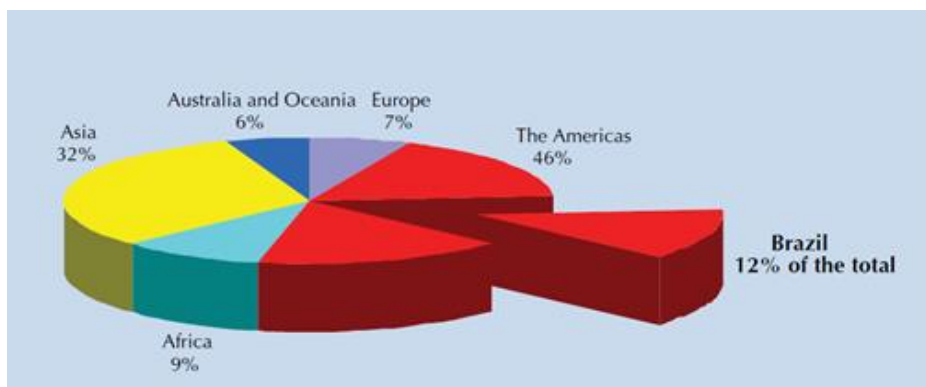


Figura 1 – Distribuição de água doce no mundo

Fonte: (1)

Segundo dados da Agência Nacional das Águas (ANA), em janeiro de 2017 havia 290 bilhões de metros cúbicos de água acumulada ao longo dos 703 reservatórios monitorados pela ANA para as diversas aplicações da demanda nacional, quais sejam a geração de eletricidade, agropecuária, indústria, abastecimento urbano e rural, e mineração (3).

Apesar de o país apresentar abundância de recursos hídricos, ainda se percebe momentos de escassez de água vivenciados pela sociedade brasileira. Um caso de grande repercussão foi a crise hídrica em São Paulo entre os anos de 2014 e 2016 (4), ocasionada pelo fato de o nível do sistema Cantareira estar abaixo do padrão. Outro problema notório de falta de água está atrelado às recorrentes estiagens sobre a Região Nordeste, as quais, segundo a ANA, atingiram cerca de 80% das pessoas afetadas por secas em todo o território nacional no ano de 2017.

1.2. Assoreamento

Os reservatórios de água são meios eficazes e de baixo custo de execução para promover maior acesso da população à água para consumo, sobretudo em regiões onde as condições climáticas apresentam longos períodos de estiagem e baixas médias anuais de precipitação.

Todavia, esses corpos lânticos estão sujeitos aos efeitos do assoreamento, caracterizado pela deposição cumulativa de partículas sólidas trazidas pela corrente de água. Isso culmina na redução gradativa da sua capacidade de armazenagem, fazendo com que os estoques de água se reduzam ao longo do tempo, intensificando os problemas de escassez desse recurso. A Figura 2 mostra o quadro de efeitos da seca observados no Brasil de 2015 a 2017 e sua distribuição conforme as Regiões Geoeconômicas.

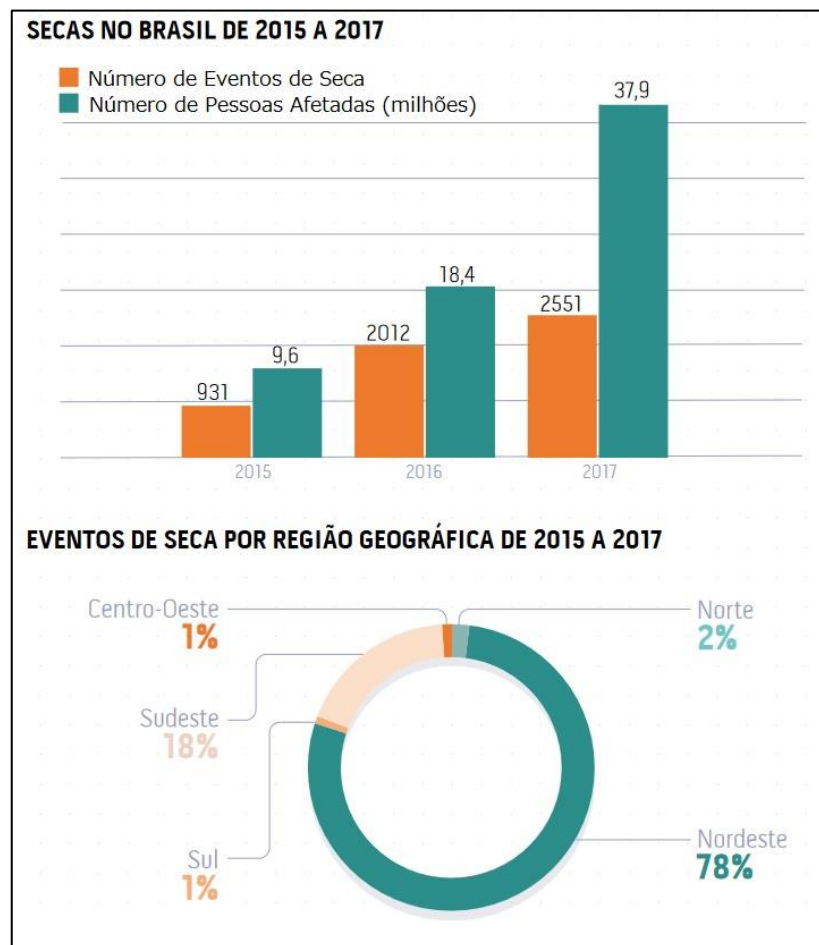


Figura 2 – Dados sobre seca no Brasil, de 2015 a 2017

Fonte: (3)

A taxa de deposição de sedimentos muda de uma instalação para outra devido a uma série de variáveis, tais como o tamanho da bacia hidrográfica, composição do solo dos arredores, vegetação, entre outros. A média mundial de perda de volume útil é da ordem de 10% a cada dez anos, sendo que o estado do Ceará apresenta uma perda média de 2% decenais. (5)

Em 2017, os açudes do Nordeste chegaram a níveis anormalmente baixos, devido à escassez de chuva que se estendia desde 2012; dentre eles, um dos mais afetados foi o Quixeramobim, construído em 1960, no Ceará, cuja perda total de volume útil é estimada

em 30% em relação à capacidade original projetada, de 54 milhões de metros cúbicos. Outros exemplos são os açudes Orós, construído em 1961, e Jaburu, ambos localizados no Ceará, cujas perdas de volume são estimadas em 10% e 18% respectivamente(5). Na região Sudeste, o reservatório dos Três Irmãos, em São Paulo, apresenta variação de volume igual a 14,5% (6).

Segundo a Agência Executiva de Gestão das Águas da Paraíba (AESA), os custos elevados no processo de desassoreamento dos reservatórios inviabilizam tal intervenção nos açudes de grande porte, uma vez que a construção de novos tanques se torna uma opção menos onerosa. Em 2018, para o desassoreamento da Barragem de Acauã, na Paraíba, estimou-se custo aproximado de R\$ 200,00 por metro cúbico retirado (7).

Embora o problema seja mais evidente em locais com climas secos, o assoreamento ocorre em todas as represas do mundo, causando perda de capacidade e exigindo obras custosas para ser corrigido; se tomarmos o volume acumulado de Quixeramobim de 16 milhões de m³ a um custo de R\$200/m³, resultaria em mais de 3 bilhões de reais.

Os impactos não se limitam à perda de volume útil em reservatórios. A intensificação do assoreamento devido à intervenção humana altera o curso de rios como o Taquari, que atravessa MT e MS. Com o leito sedimentado, sua água transborda alagando uma vasta área ao seu redor, atingindo terrenos a até 25 km de distância de onde normalmente ficariam suas margens (8). Assim, regiões que a princípio ficariam submersas apenas na época de chuvas, passam a ser cobertas por água o ano inteiro.

Isso representa sérios prejuízos para o ecossistema e também para os habitantes dos arredores, que perdem áreas de cultivo e pastagem, e a redução da produção pesqueira. Levantamentos indicam redução da ordem de 1,5 milhões de hectares de área produtiva e perdas de R\$ 1,2 bilhões somente na pecuária (9).

Portanto, existe a necessidade de se buscar alternativas para a manutenção dos recursos já disponíveis para ajudar o país a lidar com as flutuações dos recursos hídricos antes de ter de intervir no meio ambiente e construir novas instalações. Este trabalho investiga a viabilidade tecnológica de um sistema de combate ao assoreamento utilizando uma metodologia preventiva e alimentada por fontes energéticas renováveis, que pode gerar novas formas de gerir os recursos hídricos. O conceito do sistema e os modelos para estimação de seu desempenho serão apresentados nos próximos capítulos.

2. OBJETIVO

Este trabalho tem por objetivo propor um procedimento diferente para a solução do problema do assoreamento, buscando uma alternativa que pode ser mais sustentável em certos casos, a depender de características das instalações.

Para tanto, será buscado um sistema que se utilize de energias renováveis e um regime de trabalho preventivo, tratando o fenômeno antes que gere problemas ambientais ou no uso dos reservatórios.

Pretende-se também realizar este estudo como um exemplo do uso de energias renováveis empregando-as em uma utilidade específica, em vez de gerá-las para consumo, como um procedimento para aproveitar esses recursos sem depender da presença de consumidores ou redes elétricas nas imediações.

Serão utilizados modelos físicos e matemáticos para prever o desempenho de diferentes arranjos e avaliar a viabilidade tecnológica do sistema proposto. O escopo será focado principalmente na parte de movimentação de massa, ou seja, na retirada de partículas sólidas do leito assoreado. A análise econômica não faz parte do escopo deste trabalho, valores financeiros citados são meramente ilustrativos. As questões ambientais e especificidades dos regimes de trabalho de cada instalação deverão ser avaliadas caso a caso conforme as oportunidades surgirem, para poder determinar se a melhor solução para a situação é a manutenção preventiva, e como o sistema precisa ser ajustado.

Arranjos serão dimensionados considerando disponibilidade energética eólica e solar da região da cidade universitária da Universidade de São Paulo, e seu desempenho será comparado com as necessidades de reservatórios conhecidos de diferentes portes, como se instalações similares estivessem nessa região. Também será feito dimensionamento considerando as condições climáticas de Quixeramobim-CE, a fim de exemplificar a influência das condições do local de instalação.

3. REVISÃO DA LITERATURA

Este capítulo apresenta uma síntese das informações obtidas ao estudar os sistemas de combate ao assoreamento atuais; reservatórios de pequeno a médio porte com problemas de sedimentação; e uso de energias renováveis. Por fim, é introduzido o conceito do desassoreador, que será detalhado nos capítulos seguintes.

3.1. Dragagem

A dragagem de material sólido submerso geralmente é feita por meio de equipamentos embarcados em estruturas flutuantes que percorrem a superfície do volume de água em recuperação. Dadas as inúmeras variantes do processo e local de trabalho, que contemplam desde a recuperação de lagoas de pequeno porte até aprofundamento de portos marítimos, é possível encontrar diferentes equipamentos para realização do desassoreamento (10).

As técnicas empregadas nessas tarefas se dividem em duas categorias principais: a dragagem mecânica e a dragagem hidráulica. Destaca-se que existem ainda outras técnicas de dragagem em desenvolvimento. Em situações em que as distâncias entre as margens do leito permitam, há também a possibilidade de se utilizar estruturas apoiadas em terra para posicionar o elemento removedor, em vez da estrutura flutuante. (11)(12)

A dragagem mecânica consiste na remoção de material sólido por meio de mecanismos que adentram o volume de água e coletam as camadas superficiais do material imerso. São exemplos dessa aplicação a draga de escavadeira (Figura 3) e a draga “clamshell” (Figura 4) (10)(12).



Figura 3 – Draga de escavadeira
Fonte:(10)



Figura 4 – Draga de "clamshell"

Fonte: (10)

Já a dragagem hidráulica é feita por meio da sucção da água contendo material particulado em suspensão. Para máximo proveito do processo, são empregados equipamentos para perturbar a superfície imersa, de forma a garantir alta concentração de resíduos no volume de líquido bombeado. Dentre os métodos utilizados, encontra-se a draga de sucção e arrasto (Figura 5), cuja perturbação dos sedimentos se dá pela movimentação do tubo de sucção sobre a superfície, combinada com o acionamento de jatos de água direcionados ao fundo do reservatório. (11) Outra forma construtiva é a draga de sucção e corte (Figura 6), equipada com um rotor que agita o solo submerso para suspensão do particulado. (10) (13)



Figura 5 – Draga de sucção e arrasto

Fonte:(10)



Figura 6 – Draga de sucção e corte
Fonte: (13)

3.2. Assoreamento em lagoas de estabilização

O uso da água para atividades humanas implica na adição de várias substâncias nos efluentes, que precisam ser tratados antes de ser descartados na natureza, ou causariam sérios impactos negativos. Por exemplo, a quantidade de matéria orgânica na água é medida indiretamente pela Demanda Biológica de Oxigênio (DBO), que é um dos indicadores de adequação dos efluentes. O descarte de mistura com excesso de matéria orgânica poderia desequilibrar a atividade microbológica do ecossistema a ponto de inviabilizá-lo.

Lagoas de estabilização são sistemas de tratamento de efluentes que consistem em lagoas artificiais a céu aberto projetadas para promover a decantação e decomposição dos sólidos em suspensão na água. Essa decomposição controlada permite reduzir a DBO e outros fatores nocivos antes do descarte para o ambiente.

Existem vários arranjos possíveis para lagoas de estabilização. Tomando-se como exemplo o arranjo apresentado na Figura 7, o efluente chega primeiro a uma lagoa anaeróbia, projetada para ter pouco oxigênio dissolvido e promover a ação de bactérias anaeróbias que vão decompor parte da matéria carregada pela água. O funcionamento do sistema implica no acúmulo de sedimentos no fundo das lagoas que, se não for removido, reduz o seu volume útil e a eficiência do tratamento.

Em seguida o efluente parcialmente tratado é lançado em uma lagoa aeróbia, projetada para ter concentração de oxigênio suficiente para que as bactérias aeróbias possam entrar em ação e complementar o tratamento realizado na lagoa anterior. As lagoas aeróbias costumam ter superfícies mais amplas para permitir maior entrada de luz solar e atividade de algas autótrofas, e a oxigenação pode ser complementada por aeradores mecânicos. O

resultado é uma queda na DBO suficiente para que a água possa ser lançada na natureza sem impactar excessivamente o meio-ambiente. A Figura 8 apresenta a lagoa de Itatinga, em que a representação esquemática da Figura 7 foi baseada.

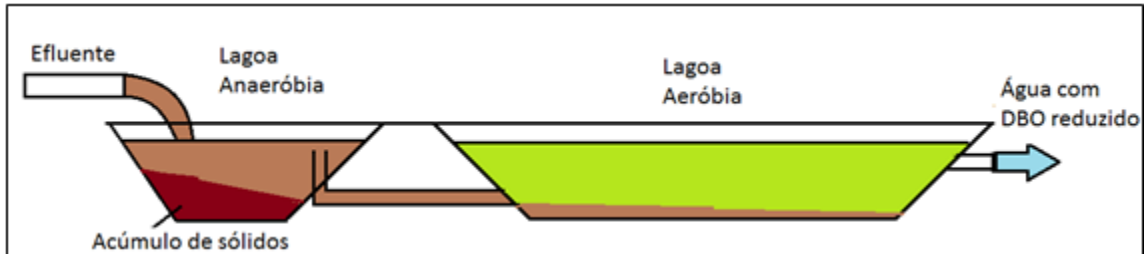


Figura 7 – Exemplo esquemático de lagoa de estabilização
Fonte: autoria própria



Figura 8 – Fotos de lagoa anaeróbia na cidade de Itatinga-SP
Fonte: autoria própria

A Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (Sabesp) possui mais de 300 unidades desse tipo distribuídas pelo Estado de SP, a maioria afastada de centros urbanos, pois seu funcionamento implica na liberação de odores desagradáveis. Muitas delas se encontram em locais remotos não atendidos pela rede elétrica.(14)

Atualmente, as lagoas recebem serviços de dragagem esporádicos, solicitados quando já se formou um acúmulo considerável de detritos que afeta seu desempenho. A operação é feita empregando-se pequenas balsas equipadas com conjuntos moto-bomba alimentados por geradores elétricos a diesel (Figura 9), que emitem poluentes. O uso de energia da rede elétrica muitas vezes é inviável, por se tratar de instalações em local afastado da população por conta da emissão de odores.

O processo de desassoreamento poderia ser feito de modo extensivo, em um regime com flexibilidade suficiente para acomodar flutuações tanto na entrada como na remoção dos detritos. Essa complacência, associada à demanda de energia em local que pode não ser atendido pela rede, cria um cenário favorável para o aproveitamento de energias renováveis

em sistemas de geração descentralizada, sendo a eólica e a solar fotovoltaica opções promissoras.

Entretanto, a decomposição dos detritos na lagoa exige tempo, e pode ser perturbada pela agitação do desassoreamento, principalmente na lagoa anaeróbica. Portanto, é necessário estudar o ritmo de intervenções adequado para mitigar o assoreamento sem comprometer a operação de tratamento.



Figura 9 – Imagens de exemplo de balsa de desassoreamento alimentada por gerador a diesel (gerador fora da imagem)

Fonte: autoria própria

3.3. Barragens de minério

Os eventos catastróficos das barragens de Mariana, em 2015, e Brumadinho, em 2019, trouxeram de volta à tona a preocupação com a manutenção das barragens de contenção de rejeitos de mineração. Infelizmente, esse não é um problema tão recente no mundo; em 1985, um reservatório com apenas 1,5% do volume de Brumadinho se rompeu, colocando o vilarejo italiano de Stava no topo da lista de letalidade em acidentes desse tipo, até a época, com cerca de 260 mortes (15).

Diversas soluções vêm sendo propostas para evitar novas ocorrências, desde melhorias no monitoramento da estrutura de contenção, até a proibição do uso de barragens construídas na modalidade “a montante”, considerada menos segura que as demais. Dentre as possíveis respostas está a coleta e utilização dos sedimentos para produção de blocos, tijolos e outros recursos para construção civil (Figura 10) (16). Seria possível adaptar um sistema de desassoreamento para barragens em operação para extrair as partículas sólidas do leito em ritmo capaz de compensar a deposição, ou instalá-los em barragens inativas, mas com risco de rompimento, minando o acúmulo gradualmente para evitar danos às paredes da instalação.



Figura 10 – Exemplos de aplicações de rejeitos de mineração, segundo a Samarco
Fonte: (16)

3.4. Destinação dos sedimentos

No caso do desassoreamento corretivo de lagoas de estabilização, devido a regulamentações ambientais e ao período entre intervenções ser de mais de 10 anos, as companhias de saneamento têm de tratar o lodo extraído para reduzir seu teor de umidade, para depois descartar o material em aterros sanitários. Isso exige o emprego de mais recursos, tais como polímeros aglutinantes, invólucros semipermeáveis (Figura 11), e sistemas ativos de separação centrífuga (Figura 12) que consomem energia para desidratar a matéria retirada do leito.

O lodo seco poderia ser aproveitado na agricultura e outras aplicações, mas, segundo relatos (Informação verbal) (17), o período longo e incerto entre as extrações de lodo inviabiliza o estabelecimento de contratos de destinação, e dificuldades logísticas e burocráticas tornam-se incentivos ao descarte em aterros.



Figura 11 – Embalagem semipermeável para secagem de lodo
Fonte: autoria própria



Figura 12 – Centrífuga para secagem e caçamba de coleta de resíduos
Fonte: (18)

Quando se trata de desassoreamento de portos marítimos brasileiros, a destinação final também tende a ser o descarte, com a diferença de que os sólidos são lançados em alto-mar(19)(20). São necessários estudos prévios e acompanhamento contínuo para reduzir os impactos ambientais e não comprometer o ecossistema nas áreas de despejo.

Tais práticas vão contra uma tendência que vem surgindo em alguns países asiáticos em expansão, como Cingapura e Vietnã, que é o emprego de sedimentos de leitos de água doce para construção civil, principalmente na produção de concreto. Embora a extração de areia em desertos possa parecer uma solução mais promissora, os grãos de areia ali encontrados são gerados pela erosão promovida pelo vento, de modo que sua granulometria torna esse material inadequado quando comparado com os sedimentos de rios e lagos (21). Já os sedimentos marítimos apresentam concentração de sal que também compromete o uso na construção civil.

A demanda é tal que companhias de construção civil importam areia de outros países, e os produtores de areia têm dificuldade em abastecer o mercado. A coleta desregulada de areia gera impactos ambientais e estruturais, como povoados pesqueiros perdendo sua fonte de sustento e pontes ruindo devido ao afundamento de suas fundações (22).

Ou seja, no panorama atual, um recurso disputado em alguns mercados está sendo continuamente desperdiçado no Brasil.

Quanto ao tratamento de lodo retirado de lagoas de estabilização, foi feito levantamento dos parâmetros operacionais e custos do processo de desassoreamento de corpos d'água de pequeno porte. Foram tomados os dados referentes à remoção de sedimentos de lagoas de estabilização realizada pela Companhia de Saneamento do Estado de São Paulo (Sabesp).

Os custos de retirada do lodo, secagem, transporte e descarte variam conforme as condições da instalação, dependendo do porte, volume de sólidos, espaço disponível, proximidade de aterros, entre outros.

O relatório da Sabesp referente à operação realizada em caráter demonstrativo na lagoa de Mombuca/SP, de 2004 (18), indica que a instalação acumulara um volume de 700 m³ de lodo com cerca de 10% de teor de sólidos. A secagem foi feita utilizando centrífuga com gerador a diesel para chegar a uma massa mais concentrada (torta) para facilitar o descarte. O detalhamento dos custos contido nesse relatório é apresentado na Tabela 1. O relatório informa que não foram feitos levantamentos dos custos de mão de obra e a margem de lucro da ofertante do serviço. As informações referentes ao custo médio para remoção e desidratação de lodo e destinação para aterro são aplicáveis a instalações quaisquer.

Tabela 1 – Levantamento de custos no processo de desassoreamento Mombuca 2004

Item	Valor
Custo de óleo diesel e polímero	R\$ 40,80 / ton. de torta
Concentração de sólidos (suspensão bombeada)	3%
Concentração de sólidos (torta pós-secagem)	33%
Custo de transporte da torta (Mombuca)	R\$ 352,00 / caçamba de 10 m ³
Custo de disposição no aterro (Mombuca)	R\$ 60,00 / ton. de torta
Custo de remoção e desidratação de lodo (geral)	R\$ 30,00 / m ³
Destinação para aterro (geral)	R\$ 70,00 / ton.

Fonte: (18)

Outro relatório elaborado pela Sabesp em 2005 (14) aborda o desassoreamento da lagoa de Jacaré, no município de Cabreúva, cuja batimetria apontava 4700 m³ de lodo a 10%, e dimensionamento para torta resultante com 25% de sólidos. A Tabela 2 contém os dados desse relatório, incluindo as correções de valor pela variação do IPCA acumulado até 2022.

Tabela 2 – Levantamento de custos no processo de desassoreamento Jacaré 2005

Item	Valor
Concentração de sólidos (suspensão bombeada)	1,4 a 5,2% (média 3%)
Concentração de sólidos (torta pós-secagem)	25%
Custo de remoção e desidratação de lodo	R\$ 90,10 / m ³
Estimativa de lodo no fundo da lagoa	4 700 m ³
Custo para a limpeza da lagoa	R\$ 423 470,00
Custo total, incluindo transporte e serviços	R\$ 690 317,95
Custo por m ³ , incluindo transporte e serviços	R\$ 146,88 / m ³
Custo por m ³ atualizado conforme o IPCA até 2022	R\$ 376,41 / m ³

Fonte: (14)

Convertendo esses valores conforme o IPCA de dez/2005 a dez/2022, acumulado de 156,27% (23), tem-se que o custo de remoção e desidratação seria de R\$230,90 por m³ de lodo a 10%, e o custo total seria de R\$376,41 por m³.

3.5. Energias renováveis

A matriz de energia elétrica brasileira é predominantemente hidráulica (Figura 13), a qual é reconhecida como forma de geração limpa, uma vez que não gera emissão direta de poluentes ao longo do processo; e renovável, dado que o ciclo da água trata de repor as reservas das represas para assegurar continuidade na captação de energia. Todavia, os impactos causados pela construção das barragens e inundação das represas, além das crises energéticas vivenciadas em função das irregularidades dos regimes pluviais das últimas décadas, têm aberto discussões para alternativas de produção de eletricidade. Para os sistemas de microgeração, usualmente se cogita a utilização de conversores eólicos e fotovoltaicos, em virtude da adaptabilidade dos geradores às aplicações pertinentes e ampla disponibilidade de regimes de ventos e zonas de insolação favoráveis. Sendo sistemas que podem captar energia e alimentar o desassoreador sem depender do transporte e queima de combustíveis, se mostram como recurso promissor para este projeto.

Os levantamentos realizados pelo Centro de Referência para as Energias Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito (CRESESB) apontam que no Brasil a incidência solar média anual fica entre 3500 e 6250 Wh/m².dia, com as maiores médias distribuídas sobre uma faixa que se estende do Rio Grande do Norte ao Mato Grosso do Sul, conforme a Figura 14(24).

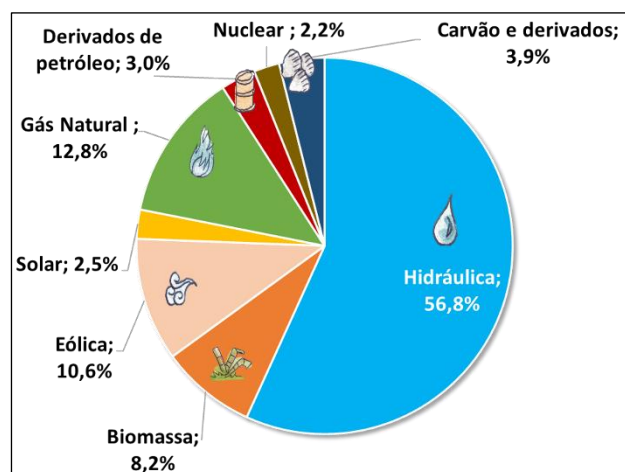


Figura 13 – Matriz elétrica brasileira 2021
Fonte: (25)

A captação e conversão da insolação em energia elétrica pode ser feita por meio de painéis fotovoltaicos, cuja eficiência de conversão é da ordem de 15% para placas comerciais à temperatura ambiente. Cabe frisar que esse percentual tende a diminuir com o aumento da temperatura do sistema.

A potência elétrica gerada pelo conjunto fotovoltaico depende de parâmetros geométricos associados à instalação do equipamento, tais quais a área do painel, a inclinação em relação ao solo e a orientação segundo os pontos cardeais; e parâmetros atrelados ao ciclo anual de insolação e taxa de difusão da luz no local (26). O CRESESB disponibiliza dados estimados de insolação diária mês a mês conforme as coordenadas locais, baseado em ponderações de medições em locais próximos. A Tabela 3 e a Tabela 4 mostram dados de irradiação solar para as coordenadas da cidade universitária da Universidade de São Paulo.

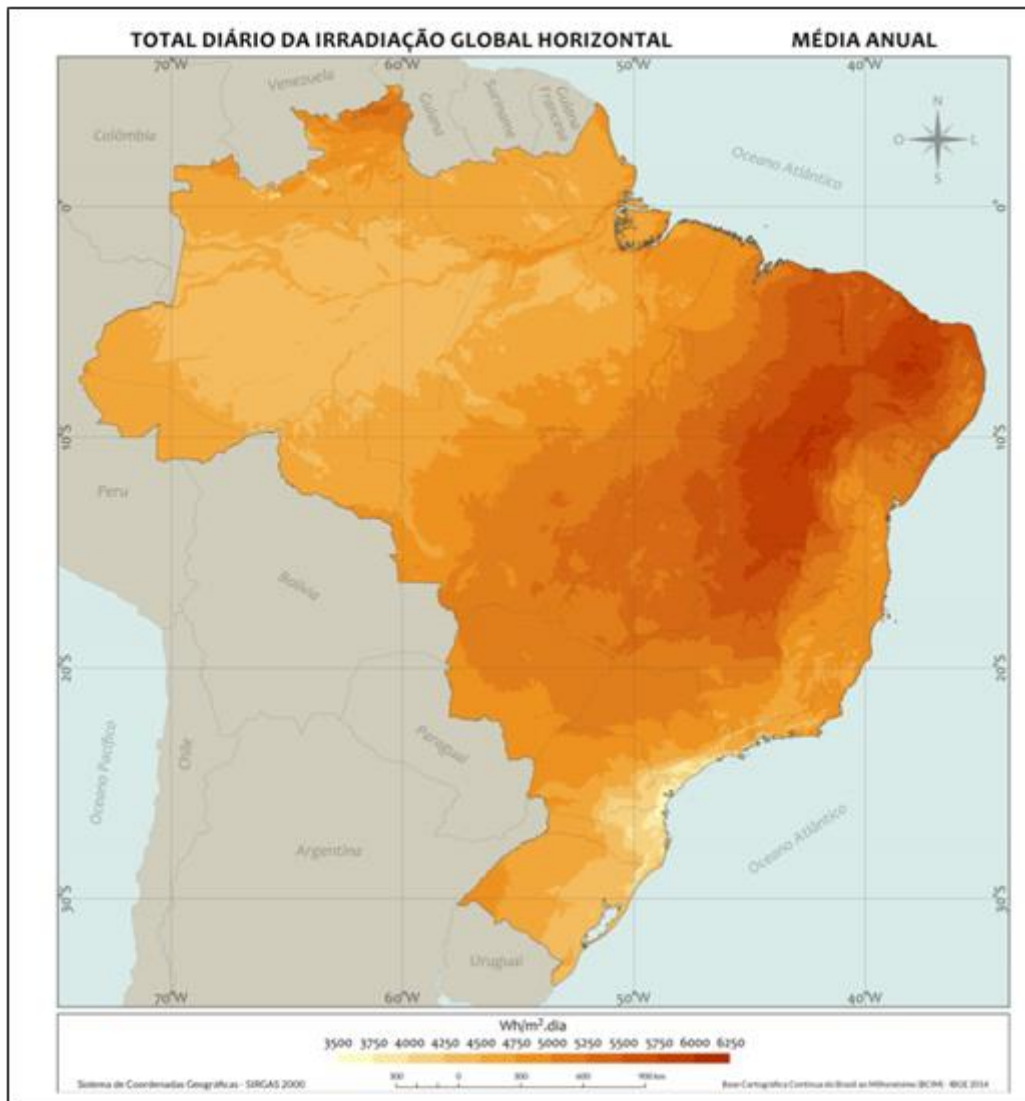


Figura 14 – Insolação média anual em plano horizontal
Fonte: (24)

Tabela 3 – Dados de irradiação solar fornecidos pelo CRESESB para medições próximas às coordenadas da cidade universitária de São Paulo (23,55° S 46,72° O)

Lat. [°]	Long [°]	Dist [km]	Irradiação solar diária média [kWh/m ² .dia]												Média	Delta
			Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez		
23,5° S	46,7° O	6,3	5,25	5,53	4,73	4,21	3,46	3,19	3,29	4,26	4,26	4,77	5,19	5,77	4,49	2,57
23,6° S	46,7° O	6,4	5,28	5,52	4,73	4,19	3,43	3,17	3,26	4,20	4,23	4,74	5,22	5,76	4,48	2,59
23,5° S	46,6° O	9,1	5,22	5,48	4,70	4,14	3,42	3,17	3,24	4,20	4,24	4,76	5,14	5,69	4,45	2,52

Fonte: (27)

Tabela 4 – Dados de irradiação solar fornecidos pelo CRESESB para medições em 23,5°S 46,749°O, considerando diferentes inclinações de painel solar

Ângulo	Incl	Irradiação solar diária média mensal [kWh/m ² .dia]												Méd	Delta
		Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez		
Plano Horizontal	0°N	5,25	5,53	4,73	4,21	3,46	3,19	3,29	4,26	4,26	4,77	5,19	5,77	4,49	2,57
Ângulo igual a latitude	24°N	4,74	5,26	4,86	4,78	4,29	4,17	4,19	5,07	4,53	4,65	4,76	5,11	4,70	1,10
Maior média anual	21°N	4,83	5,33	4,88	4,74	4,21	4,07	4,10	5,00	4,53	4,70	4,84	5,23	4,71	1,26
Maior mínimo mensal	34°N	4,39	4,97	4,74	4,83	4,47	4,41	4,40	5,21	4,48	4,44	4,42	4,69	4,62	0,83

Fonte: (27)

Para os sistemas aerogeradores, o detalhamento do comportamento das massas de ar é fundamental na determinação do potencial energético. No Brasil, verifica-se que a velocidade média anual dos ventos é da ordem de 4 m/s na maior parte do território, conforme dados divulgados pelo CRESESB. As exceções concentram-se sobretudo nas regiões litorâneas do país, onde as médias variam de 8 a 10 metros por segundo (Figura 15). Mas a média sozinha não basta para avaliar o potencial eólico.

O estudo do CRESESB também contempla informações referentes às direções predominantes de movimentação das massas de ar, distribuição da velocidade dos ventos ao longo do ano e fatores de rugosidade associados à disposição do terreno e obstáculos à passagem do ar. Com essas informações, pode-se estimar a capacidade de geração de uma turbina eólica (26).

A estimativa da capacidade do aerogerador consiste em avaliar a potência convertida ao longo do tempo para cada velocidade de vento. É válido ressaltar que as medições de velocidade apresentadas no Atlas do CRESESB foram feitas a determinadas alturas, as quais

podem não corresponder à real cota de instalação do rotor da turbina eólica. Dessa forma, pode-se fazer a correção dos valores medidos conforme leis matemáticas para previsão do perfil de velocidades da camada limite do ar em movimento. A equação (1) apresenta a lei de potência, na qual V_H é a velocidade do escoamento estimada a uma altura H acima do solo, n é o coeficiente de rugosidade do terreno (Tabela 5) e o índice 0 indica os dados do ponto de medição.

Tabela 5 – Fator de rugosidade n

Descrição do terreno	Fator de rugosidade n
Superfície lisa, lago ou oceano	0,10
Gramma baixa	0,12
Vegetação rasteira (até 0,3m), árvores ocasionais	0,16
Arbustos, árvores ocasionais	0,20
Árvores, construções ocasionais	0,22 – 0,24
Áreas residenciais	0,28 – 0,40

Fonte: (26)

$$V_H = V_0 \left(\frac{H}{H_0} \right)^n \quad (1)$$

Para uma estimativa mais detalhada do perfil eólico, que não se limite apenas ao valor médio, é comum adotar um modelo de distribuição de Weibull (26), que aproxima a probabilidade de ocorrência de uma determinada velocidade do vento pela função apresentada na equação (2).

$$p(V) = \frac{k}{c} \cdot \left(\frac{V}{c} \right)^{k-1} \cdot \exp \left[- \left(\frac{V}{c} \right)^k \right] \quad (2)$$

Onde $p(V)$ é a probabilidade de ocorrência da velocidade V , k é o chamado fator de forma e c é o chamado fator de escala (26). A Tabela 6 mostra um exemplo de como os dados são disponibilizados pelo CRESESB, discriminados por trimestre.

Tabela 6 – Dados eólicos do CRESESB, exemplo da cidade universitária de São Paulo (coordenadas 23,55° S 46,72° O)

Atlas do Potencial Eólico Brasileiro		Dados de vento a 50 m de Altura				
Grandeza	Unidade	Dez-Fev	Mar-Mai	Jun-Ago	Set-Nov	Anual
velocidade média do vento	m/s	3,11	3,7	4,2	3,97	3,75
fator c	-	3,51	4,18	4,73	4,48	4,23
fator k	-	2,14	2,21	2,48	2,34	2,26
densidade de potência	W/m ²	33	54	72	64	56

Fonte: (28)



Figura 15 – Velocidade média anual dos ventos a 30 m de altura
Fonte: (29)

Com os coeficientes de distribuição k e c divulgados pelo CRESESB (28) pode-se determinar uma distribuição de probabilidades de velocidades, corrigir pela diferença entre a altura das medições e a altura de instalação da turbina, e então cruzar com a curva de potência da turbina (Figura 16) para calcular a porcentagem de tempo que ela operaria em cada faixa de potência, obtendo-se assim uma estimativa da potência média. É possível fazer tal estimativa para diferentes épocas do ano, acompanhando as variações sazonais.

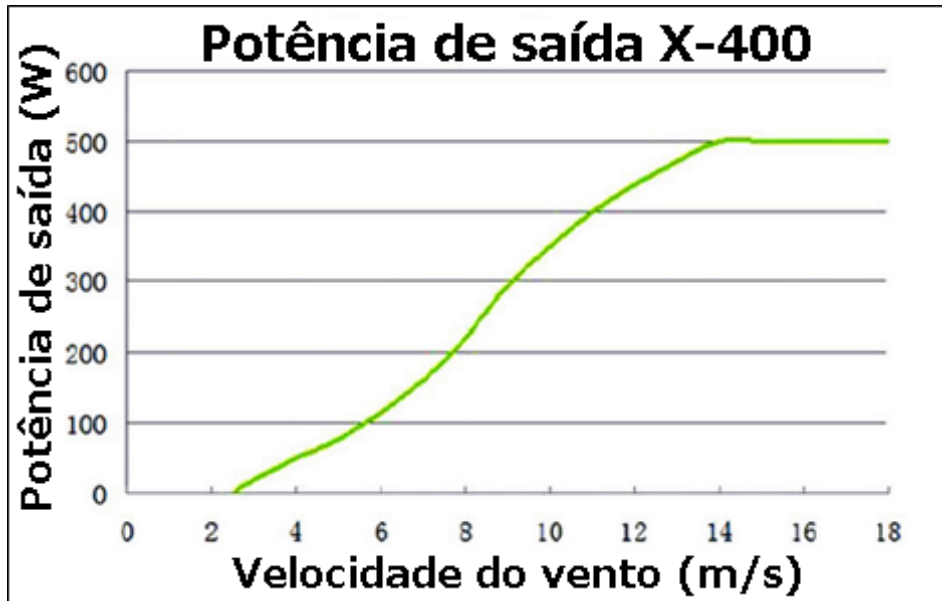


Figura 16 – Exemplo de curva de potência de uma turbina eólica
Fonte: (30)

As tecnologias para aproveitamento de energias solar e eólica vêm se diversificando e reduzindo seus custos. No entanto, sua aplicação encontra desafios no que diz respeito à integração com a rede elétrica (31).

Os sistemas de distribuição de energia foram projetados para lidar com uma demanda flutuante e fontes tradicionais, sejam hidrelétricas cuja vazão pode ser controlada, sejam turbinas a vapor (acionadas a combustíveis ou reator nuclear) com regime ajustável.

As energias renováveis, no entanto, não podem ser controladas livremente; sua disponibilidade depende da geografia e das condições meteorológicas, as quais mudam a cada instante, independente da demanda.

Assim, uma população cujo suprimento de energia dependesse unicamente de uma fonte fotovoltaica ficaria desabastecida à noite, e uma fonte eólica poderia ser insuficiente em dada época do ano.

Em locais isolados abastecidos apenas por turbinas eólicas e painéis solares, é comum a utilização de equipamentos de acumulação de energia, geralmente bancos de baterias, para coletar a energia produzida em excesso em alguns momentos e disponibilizá-la nos momentos de baixa produção. Gera-se assim um benefício limitado, que abrange apenas a comunidade local.

No caso de parques eólicos ou solares integrados à rede de distribuição, é possível coordenar as diferentes fontes para aproveitar ao máximo a oferta de cada uma, mas isso

exige um sistema de cooperação bem estabelecido e o desenvolvimento de políticas de tarifação dos consumidores e pagamento aos fornecedores para acomodar a nova dinâmica do mercado energético.

Em países e Estados que expandiram o uso de energia fotovoltaica e eólica, com instalação de parques e microgeração doméstica, há tendência de aumento das tarifas de energia e gasto total dos consumidores com energia, um fenômeno que contraria as expectativas de um cenário de aumento de oferta.

Um motivo bastante debatido se concentra nas políticas de tarifação e precificação, ainda muito baseadas nas fontes não-renováveis, com sistemas em que o preço é baseado no gerador de maior custo. (32)

Dentre outras explicações sugeridas para esse comportamento está o fato de que a tarifa das companhias de energia envolve não apenas os kWh consumidos, mas também os gastos com infraestrutura, mão-de-obra, manutenção, entre outros. Assim, conforme os micro geradores reduzem seu consumo líquido, as tarifas precisam ser aumentadas para cobrir os custos de distribuição, onerando aqueles que não instalam painéis e turbinas em suas casas. Há também casos em que a acomodação das novas fontes exige exportação de energia para estados vizinhos durante períodos de excesso de oferta e importação nos períodos de escassez, além da necessidade de instalar equipamentos novos na rede para equilibrar o sistema, e os custos são repassados para a população.

3.6. Solução proposta

Diante disso, propõe-se um método que se utiliza da independência do sistema de microgeração isolada, mas que tem uma utilidade mais abrangente do que apenas abastecer residências. O problema do desassoreamento se apresenta como um bom exemplo de necessidade que pode ser atendida por tal estratégia.

O acúmulo de sedimentos ocorre de forma gradual e perpétua, de modo que uma solução preventiva seria mais propícia que a metodologia corretiva vigente.

Os reservatórios de água levam anos para acumular detritos suficientes para prejudicar sua operação, então há uma complacência que pode acomodar as variações de desempenho de um desassoreador alimentado por energias solar e eólica conforme as condições meteorológicas oscilem.

Corpos de água afastados da rede elétrica, como lagoas de estabilização, poderiam ser atendidos de forma contínua em vez das dragagens emergenciais, o que também permite uma estratégia de destinação dos resíduos mais bem planejada do que descarte em aterros. Por exemplo, destinar para produção de fertilizantes, ou como insumo para biodigestores. Essas opções acabam sendo descartadas hoje devido a questões contratuais e burocráticas que são agravadas pelo regime variável das operações corretivas, o que inviabiliza o estabelecimento de um fornecimento regular de material sólido.

Outros desafios mais complexos, como desassoreamento de rios ou grandes represas, exigirão estudos mais aprofundados devido ao porte maior, impactos ambientais e a todas as questões logísticas associadas. Em todo caso, o desassoreador eólico-solar pode ser uma opção para lidar com a parte de remoção dos sólidos, independente da estratégia de destinação adotada.

Como se trata de uma aplicação tecnológica sem registro de uso anterior, não se tem informações sobre sua viabilidade, limitações e possibilidades. Portanto, serão utilizados modelos físicos e matemáticos baseados em informações de componentes disponíveis no mercado para simular como o sistema se comportaria.

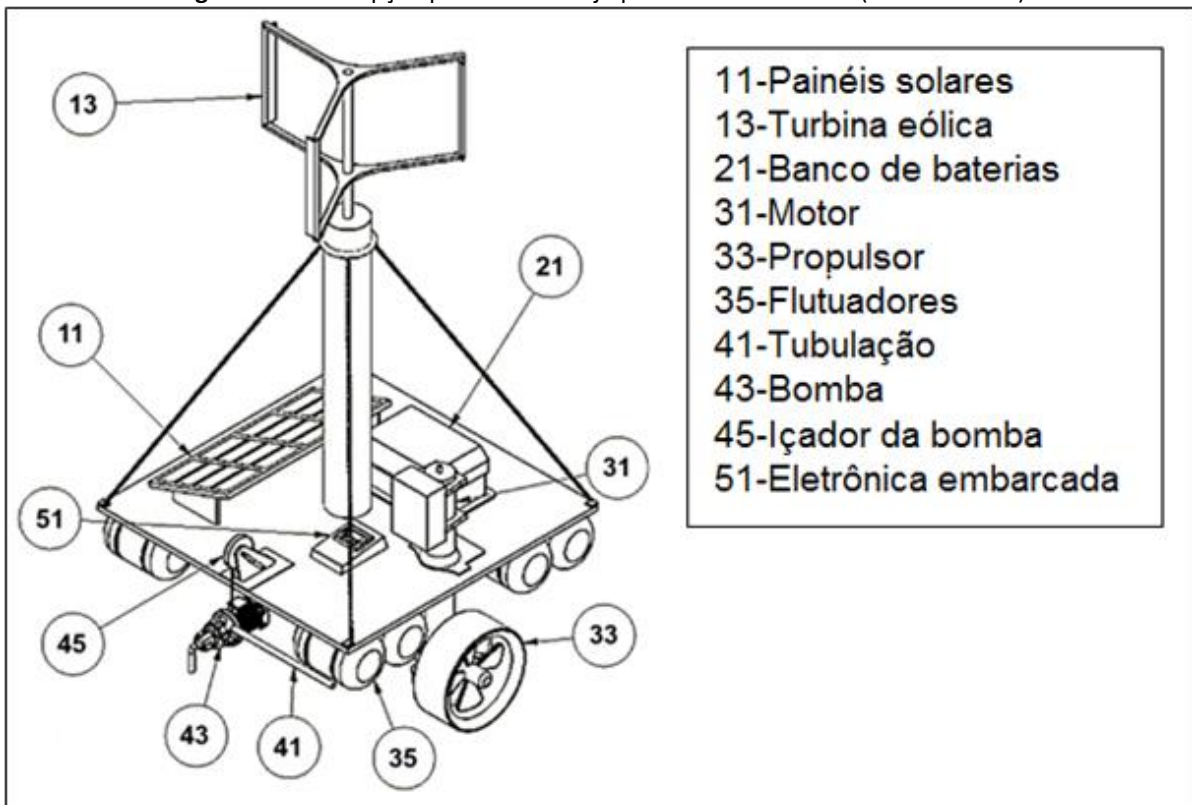
4. METODOLOGIA

4.1. Sistema proposto

O arranjo básico foi determinado com base nos requisitos para trabalhar em lagoas de estabilização. Trata-se de uma solução de operação simplificada similar às pequenas balsas de dragagem ora utilizadas pelas empresas do ramo, com a intenção de facilitar a transição da mão-de-obra de uma tecnologia para a outra.

A Figura 17 mostra o diagrama contido no pedido de patente submetido ao Instituto Nacional da Propriedade Industrial (INPI) (33), mostrando conceitualmente os principais componentes do sistema.

Figura 17 – Concepção prévia de arranjo para o desassoreador (fora de escala)



Fonte: (33)

Os painéis solares seriam instalados na horizontal ou com pequeno ângulo de inclinação tal que os operadores não tenham que se preocupar com a orientação do desassoreador em relação aos pontos cardeais e ajustá-la conforme a estação do ano.

A turbina eólica pode ser selecionada dentro de certa faixa de potência conforme o custo-benefício disponível no mercado. Um poste de sustentação seria usado para posicioná-la em altura suficiente para alcançar ventos de velocidade aproveitável.

As potências geradas nos painéis e na turbina seriam medidas e direcionadas para o banco de baterias. A saída da turbina passaria por uma ponte retificadora, e ambas precisariam de um ajuste de tensão.

Seria possível trabalhar sem baterias, com transmissão direta para o sistema de bombeamento, mas isso implicaria em alguns reveses.

Primeiro, o ponto de operação do conjunto bombeador apresenta uma relação entre vazão, pressão fornecida (também referida como *head*, carga ou coluna, com algumas diferenças conceituais), potência consumida e eficiência. As bombas centrífugas costumam ter vida útil mais longa quando operam dentro de um intervalo ao redor do ponto de máxima eficiência. Deixar a operação seguir diretamente a oferta de energia significaria oscilações frequentes que desgastariam o conjunto bombeador mais rapidamente, levando a falhas e aumentando os custos de manutenção e a indisponibilidade do sistema. O uso de baterias permite maior confiabilidade e segurança operacional ao colocar o conjunto bombeador para trabalhar em uma faixa controlada de parâmetros que leva a maior eficiência dos equipamentos rotativos e vida útil mais longa. (34)

Segundo, o equipamento foi pensado primeiro para atender a instalações de pequeno porte, e com automação limitada, exigindo um operador para controlar o conjunto. Propondo uma rotina de trabalho de um operário comum, de um turno por dia, a captação e o armazenamento podem ser projetados para coletar a energia disponível em um dia inteiro para ser usada em menos de 8 horas de trabalho.

Terceiro, o arranjo precisa de um *head* mínimo para conseguir vencer as diferenças de cota e as perdas de pressão e enviar o fluido para a descarga, além de estabelecer vazão suficiente para levantar os sólidos do leito e para mantê-los em suspensão na tubulação. Então, mesmo que o sistema fosse todo automatizado, o controle teria que ser estabelecido para não ligar a menos que a potência disponível estivesse acima de um determinado patamar, desprezando toda a energia dos momentos de baixa captação. Por outro lado, usar um sistema que aceitasse potências tão baixas quanto possível significaria baixas eficiências nos períodos de alta captação. Então, apesar de a transmissão direta evitar a perda de eficiência associada à conversão e ao armazenamento, ela implica em outros desperdícios.

Portanto, para este estudo, será considerado uso de baterias.

O controle eletrônico comandaria o envio de energia das baterias para o conjunto motobomba responsável por aspirar a mistura de líquido e partículas sólidas. O ponto de operação será estimado a partir dos modelos físicos e matemáticos conforme os parâmetros da instalação. A conexão do banco de baterias DC para o motor elétrico comercial AC (tipo mais disponível no mercado) exigiria inversores de frequência e soft starters, dependendo do porte.

Lagoas de estabilização costumam ter larguras de até algumas dezenas de metros, o que permite o uso de cabos guia ancorados nas margens para posicionar a balsa de dragagem. Para locais de instalação em que o uso de cabos guia seja inconveniente, poderia ser instalado um motor de propulsão elétrico, também usando a energia das baterias convertida para AC gerada pelo controle eletrônico, incluindo comandos de um operador. Isso pode exigir uma quantidade maior de coletores de energia e baterias.

O conjunto motobomba precisa ficar próximo ao leito, então seria posicionado por um cabo preso a uma polia, que pode ser acionada manualmente ou, se o porte exigir, por mais um motor elétrico.

Uma tubulação flexível encaminharia a mistura expelida pela bomba para um dispositivo de separação na margem ou em uma balsa auxiliar. As diferentes tecnologias e configurações para separar os sólidos do líquido poderão ser brevemente enumeradas, mas não serão foco da modelagem e investigação.

As dimensões da balsa e a quantidade de flutuadores seriam determinadas conforme a massa do conjunto, área necessária para os painéis, equilíbrio do momento na turbina eólica, entre outros.

A eletrônica embarcada contaria também com sensores meteorológicos para coleta de dados sobre o desempenho do sistema e detecção de necessidade de troca dos painéis fotovoltaicos ou da turbina quando seus rendimentos degradarem.

4.2. Modelo

4.2.1. Energia eólica

Os dados fornecidos pelo CRESESB (28) para algumas localidades selecionadas serão usados como base para determinar a potência eólica disponível (coeficientes k e c da distribuição de

Weibull), conforme Equação (2). Tais dados muitas vezes são interpolações, pois o CRESESB não conta com anemômetros em todo o território nacional. Portanto, para estudos que tenham um histórico de dados eólicos coletados localmente, estes poderão ser adotados. Os cálculos também podem ser refeitos com outras bases de dados para se ter uma faixa de valores possíveis.

As medidas anemométricas serão corrigidas de acordo com a altura de medição do vento e a de instalação da turbina segundo a lei potencial apresentada na Equação (1). O coeficiente de rugosidade seria ajustado conforme o terreno ao redor; quando não houver essa informação, será assumido o valor de 0,12, correspondente a um intermediário entre uma superfície de um reservatório de água e uma vegetação rasteira nos arredores (26).

Dessa forma, pode-se estimar qual percentual de tempo o vento sopra em cada faixa de velocidades. Além disso, os coeficientes de probabilidade são dados separadamente para cada estação do ano, o que permite uma abordagem mais detalhada. Para cada faixa de velocidades, as turbinas eólicas captam determinada potência, e assim estima-se a energia média obtida por dia.

As curvas de potência fornecidas por fabricantes de turbinas eólicas são calibradas para a massa específica (ρ) do ar em condições normais de pressão e temperatura. A razão entre ρ do ar na altitude do local de instalação e do ρ ar ao nível do mar é utilizada para corrigir a potência gerada. Os detalhes podem ser observados no APÊNDICE A.

4.2.2. Energia solar

O CRESESB (27) fornece dados de insolação média diária usando interpolação de medições feitas em pontos espalhados pelo Brasil. Os dados são discriminados para cada mês do ano, em vez da divisão trimestral dos dados eólicos. Essa informação já fornece a média para painéis horizontais e para determinadas inclinações, e inclui a influência da nebulosidade habitual da região.

Os painéis serão considerados como instalados em posição horizontal. Embora o uso de inclinação seja um método para aumentar o aproveitamento da energia incidente, ela exigiria certo cuidado do operador para alinhar corretamente o desassoreador, sob o risco de se obter o efeito inverso e diminuir o rendimento. A ideia é fazer as estimativas com o equipamento mais simples.

A área e a eficiência dos painéis são informadas pelo fabricante. O ideal seria dispor de uma curva de desempenho do painel, mostrando como sua eficiência varia conforme o nível de insolação incidente; mas tal curva não costuma ser disponibilizada, então será adotado o valor único indicado.

Assim, pode-se estimar quanta energia será obtida no local de instalação a cada mês com cada painel fotovoltaico, e disto se obtém a quantidade necessária de painéis para alimentar um determinado arranjo do sistema.

No entanto, existe o fator do sombreamento: conforme a posição da balsa e do sol, a turbina eólica e a estrutura que a suporta projetam sua sombra cobrindo parte dos painéis. Isso faz com que parte das células fotovoltaicas não capte energia, e pode causar problemas como superaquecimento (mitigado em modelos atuais, que têm diodos de proteção) ou desempenho elétrico irregular, reduzindo a potência fornecida. Esse problema pode ser parcialmente reduzido com o uso de um poste treliçado em vez de uma casca cheia para sustentar a turbina, mas com os painéis e o aerogerador instalados na balsa, é inevitável que algum sombreamento aconteça.

Adicionalmente, em instalações como as lagoas de estabilização, é comum plantar uma cerca de árvores altas em toda a volta da instalação, a fim de reduzir a dispersão de maus odores para a vizinhança. Isso significa que, dependendo do horário do dia e da posição da balsa, a incidência solar pode ficar total ou parcialmente bloqueada, e o desempenho do sistema será menor do que os valores de catálogo poderiam apontar. Tudo isso reforça a necessidade de se estudar cuidadosamente cada instalação candidata para adequar o sistema à situação de trabalho.

Para contabilizar o efeito de desvios como sombreamento, alta temperatura, sujeira e incidência reduzida, pode-se adotar um fator de redução (*photovoltaic derating factor*) entre 80% (muitos desvios) e 85% (poucos desvios).(35)(36)

Optou-se por estudar o uso de painéis e turbinas eólicas embarcados para evitar a necessidade de cabos elétricos que possam ser mergulhados em água de esgoto (lagoas de tratamento), que poderiam representar custo adicional significativo. Também, há relatos de que instalações isoladas como represas são alvo de furtos dos equipamentos mais caros

(informação verbal)(17), como motores elétricos, de modo que manter os componentes isolados na balsa no meio do reservatório poderia desencorajar esse tipo de crime.

4.2.3. Conversão e armazenamento de energia

Deve ser realizado o condicionamento da energia captada pelos painéis fotovoltaicos (usando rastreamento de máxima potência MPPT) e pela turbina eólica (de corrente alternada para contínua) para armazená-la em baterias. Devido a conversões e eficiência de armazenamento, será considerado um percentual de perdas.

Os ciclos de carga e descarga de baterias desgastam as peças, gradualmente reduzindo sua capacidade de armazenamento. Uma recomendação para estender a vida útil de baterias comuns é limitar a profundidade de descarga a 20%, além de evitar que ocorram temperaturas altas no banco de baterias (37). Os controles de armazenamento podem ser ajustados para tentar manter as baterias entre 70 e 90% carregadas, por exemplo, e para permitir um grau de flexibilidade controlado para mais ou para menos.

Essas características serão consideradas para estimar o número de baterias necessárias.

A potência captada pela balsa pode ser distribuída por um sistema gerenciador de baterias (BMS) para o banco de baterias, interrompendo o fornecimento quando elas estiverem todas na carga máxima estipulada, e enviando um alerta para o operador quando a carga estiver abaixo de um valor mínimo adotado baseado na profundidade de carga selecionada.

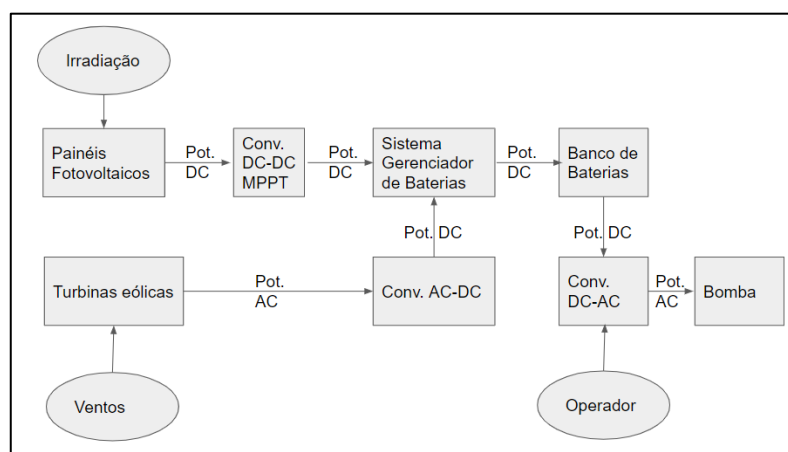


Figura 18 – Diagrama do sistema de controle e fluxo de potência no arranjo básico
Fonte: autoria própria

A simplicidade do arranjo da Figura 18 pode ser suficiente para uma etapa de protótipo focada em estudar experimentalmente as variáveis de interesse do projeto, mas implica no revés de ineficiência energética, pelo fato de toda a potência captada ter de ser armazenada

nas baterias e depois recondicionada para alimentar o bombeamento. Este será o arranjo considerado para um dimensionamento conservador.

Há uma grande quantidade de incertezas sobre o funcionamento do sistema em condições de operação diversas, de modo que um operador humano é mais adequado. Caso se chegue a uma etapa de maturidade da tecnologia que torne viável e vantajoso, pode-se estudar a implementação de um operador automatizado.

Uma arquitetura alternativa mais eficiente é a concebida para redes de microgeração, em que a potência pode ser enviada diretamente para as cargas nos períodos de atividade, e apenas o excedente é encaminhado para as baterias, para ser consumido em momentos de demanda maior do que a captação. Esse arranjo exige sistemas de inversores inteligentes com função bidirecional (converte tanto de AC para DC como de DC para AC), e deve ser feita uma análise técnica e econômica em etapas futuras para avaliar qual opção é mais adequada (38). A Figura 19 apresenta um diagrama de sistema com microgeração; no caso do desassoreador, as diferenças principais são que não haveria conexão com rede elétrica nem geradores, e a carga predominante seria a bomba AC, controlada por um operador humano ou por um dispositivo automático.

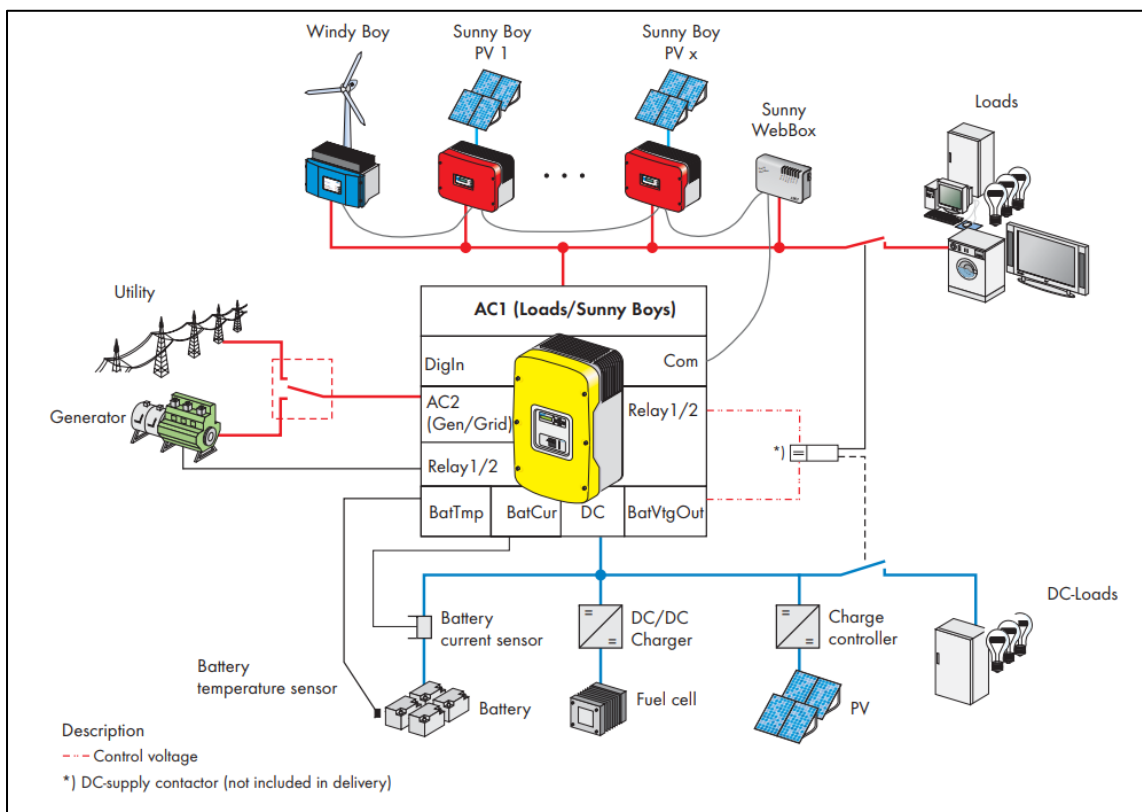


Figura 19 – Diagrama de uma rede de microgeração utilizando inversor inteligente com função bidirecional
 Fonte: (38)

4.2.4. Bombeamento de líquidos

O estudo focará no bombeamento de líquidos com partículas sólidas em suspensão relativamente pequenas (matéria orgânica dispersa, areia fina). Em etapas futuras poderá ser necessário estudar maneiras de trabalhar com sólidos maiores e irregulares, como lixo (latas, garrafas, pedaços de madeira) e rejeitos de mineração heterogêneos (desde areia grossa até pedregulhos).

As bombas a ser utilizadas devem ser projetadas para lidar com sólidos misturados no líquido aspirado. Isso geralmente significa uso de folgas internas maiores, o que reduz o rendimento, mas evita travamentos e desgaste excessivo.

As curvas de carga versus vazão fornecidas pelos fabricantes serão aproximadas por polinômios e podem ser ajustadas por similaridade para operação em condições alteradas. O cruzamento dessa informação com um modelo polinomial de perda de carga na condução do fluido pela tubulação fornece o ponto de operação estimado para cada conjunto de condições de funcionamento.

Assim é possível, por exemplo, estimar como será a operação com suspensão de concentração variável. O foco será dado à variação na massa específica da mistura trabalhada. A variação de viscosidade será desprezada neste estudo, assumindo-se que concentrações (tipicamente menos de 10% em volume) sejam baixas o suficiente para que essa hipótese seja razoável.

4.2.5. Bombeamento de sólidos em suspensão

O problema seria relativamente simples se fosse limitado ao bombeamento de um líquido newtoniano, ou de uma mistura com concentração constante e conhecida. No entanto, o interesse da aplicação está na capacidade de suspender sólidos depositados e arrastá-los através de uma corrente líquida.

Trata-se de um fenômeno que envolve muitas variáveis, dentre elas (39):

- Massa específica do fluido
- Viscosidade do fluido
- Massa específica do particulado
- Distribuição de tamanho das partículas
- Formato das partículas

- Geometria do espaço em que se dá o escoamento
- Compactação das partículas assentadas

Cada uma dessas características altera o comportamento da interação entre fluido e particulado (Figura 20). Em linhas gerais, a camada mais superficial de sedimentos depositados é perturbada pela vazão do meio que o cobre. A partir de certa velocidade, as forças viscosas e a distribuição de pressões são suficientes para fazer com que as partículas se movam próximas ao leito, se arrastando, rolando ou se erguendo brevemente e se depositando um pouco a jusante. Esse é o chamado *bed-load transport*.

Portanto, existe uma velocidade mínima necessária para que se possa aspirar partículas sólidas junto com o fluido. De forma análoga, se um fluxo carregando partículas encontrar uma condição de velocidade muito baixa, pode ocorrer deposição dos sólidos, que deve ser evitada no transporte da mistura bombeada.

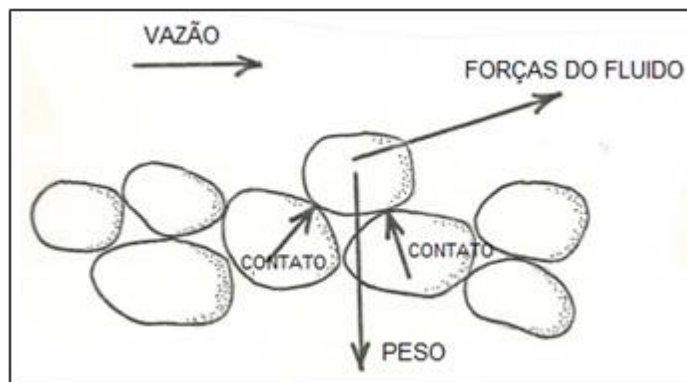


Figura 20 – Forças atuando em uma partícula depositada.
Fonte: adaptado de (39)

Vários estudos experimentais foram realizados para determinados conjuntos de parâmetros a fim de, por exemplo, prever a sedimentação ou erosão de um rio. Esse é o caso do diagrama de Hjülstrom, mostrado na Figura 21.

Existem outras referências na literatura como, por exemplo, o diagrama de Shields, que aborda a questão com uso de adimensionais. No entanto, assim como o diagrama de Hjülstrom, apresenta estimativas de transição do tipo de transporte, mas não permite calcular a quantidade de sólidos que seria carregada.

Outros modelos encontrados divergem quanto a suas previsões e exigem caracterização dos sedimentos e do fluido bombeados, que não necessariamente serão viáveis de se obter. Por exemplo, o leito de uma lagoa de estabilização pode ter uma mistura de areias de várias granulometrias, matéria orgânica e lixo (latas, pedaços de plástico, etc.), além de um meio

aquoso contaminado com todo tipo de produto químico e dejetos que podem mudar sua viscosidade e sua tensão superficial.

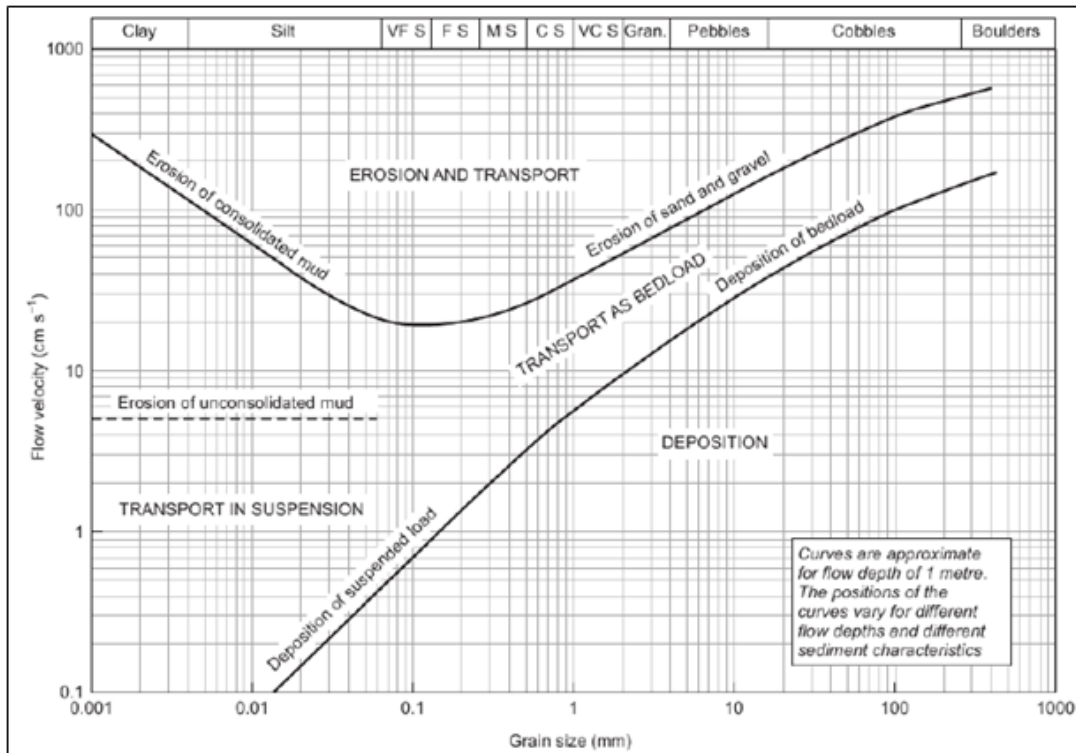


Figura 21 – Diagrama de Hjulström

Fonte: (40)

Trata-se de um problema muito complexo que ainda não foi completamente mapeado, e que exigiria o levantamento de muitos dados experimentais sobre o comportamento dos materiais do local de instalação para que se fizesse uma previsão mais acurada.

O que se pode concluir de modo geral é que, quanto maiores forem as velocidades de escoamento desenvolvidas, maior será a promoção de transporte das partículas sólidas e menor a probabilidade de deposição dos resíduos no meio da tubulação.

Dessa forma, para o primeiro modelo estudado foi assumida uma concentração constante. Na segunda iteração, a concentração de sólidos na mistura bombeada, em termos de proporção volumétrica, será representada por um polinômio de segunda ordem, da forma mostrada na Equação (3)

$$C = a_c Q^2 + b_c Q + c_c \quad (3)$$

Onde C é a concentração em unidades de volume de sólidos em relação ao volume bombeado, Q é a vazão volumétrica aspirada pela bomba, e a_c , b_c e c_c são os coeficientes de ajuste. Pela tendência esperada dos modelos estudados até o momento, a concentração tende a aumentar quanto maior a vazão, então a_c e/ou b_c devem ser positivos.

De certa forma c_c ajusta a curva para simular a vazão mínima necessária para que haja suspensão dos sedimentos. Portanto, c_c tende a ser negativo, a menos que se adote um modelo de concentração constante.

Para se ter uma base, serão usados os dados de desassoreamento da lagoa de Mombuca (18), que indicava que uma bomba de vazão nominal $35\text{m}^3/\text{h}$ era capaz de aspirar os sedimentos acumulados em concentração de 1,3 a 5,2%, com média de 3%. Serão usados outros modelos procurando averiguar o quanto o dimensionamento do sistema pode ser afetado pelo comportamento da suspensão de particulado.

4.2.6. Separação da mistura

Quando os sedimentos apresentam massa específica suficientemente maior que a da água, pode ser conveniente utilizar um separador do tipo hidrociclone (Figura 22), um dispositivo passivo que divide uma vazão de suspensão em dois fluxos, uma com concentração de partículas mais alta que a outra. O fluxo mais concentrado deve ser encaminhado para balsa de acúmulo de sedimento ou para separadores na margem, enquanto o menos concentrado retorna para a represa, reduzindo assim o volume de mistura a ser processado.

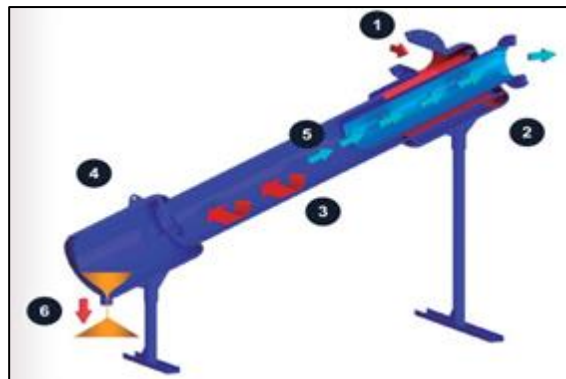


Figura 22 – Ilustração do funcionamento de um separador hidrociclone.

Fonte: (41)

Quanto maior a diferença de massa específica entre as partículas e o líquido, maior o percentual de sólidos enviado para o fluxo de alta concentração. Essa eficiência de separação pode variar conforme diversos fatores, como a vazão total, concentração inicial, pressões em ambas as saídas, granulometria das partículas, entre outros. Para determinar a eficácia e adequação do hidrociclone e de outros métodos de separação ao conjunto de desassoreamento, serão necessários estudos experimentais. Por ora, serão representados por uma perda de carga concentrada na descarga da tubulação, a qual pode englobar outros dispositivos que venham a ser necessários, como válvulas ou conexões.

5. RESULTADOS

5.1. Potencial energético

A fim de estimar o potencial energético do sistema proposto, uma consulta ao banco de dados do CRESESB informa que, no Brasil, a incidência solar é tal que um painel instalado na horizontal recebe uma média anual entre 14 e 20 MJ por metro quadrado a cada dia (ou 3,9 a 5,6 kWh/dia.m²), a depender da região (tipicamente mais alto no Nordeste, mais baixo no Sul) (24).

Tomando-se um painel solar de 1,95m x 0,99m, aproximadamente 2 m², e eficiência de conversão nominal 17% (42), poderia captar até 1,33 a 1,90 kWh por dia. No entanto, essa eficiência é tomada em condições de laboratório ideais de temperatura, sem sombreamento nem sujidades, que são condições adversas comuns em campo. Dessa forma, é comum adotar um fator de aproveitamento de 80% a 85% para representar esses desvios. Adota-se o fator de 80%, em vista do sombreamento esperado da vegetação e do poste da turbina. Na região da Cidade Universitária de SP, a incidência média é de 4,5 kWh/m².dia, de modo que um painel instalado nas condições descritas capta em torno de 1,18 kWh/dia.

Quanto à captação de energia eólica, o Atlas do Potencial Eólico Brasileiro (43) mostra que a variação é mais acentuada que a do caso solar; exibindo valores médios da velocidade do vento medida a 50 metros de altura entre 3m/s e 8,5m/s. Sabe-se que o comportamento do vento varia muito conforme aspectos locais diversos, de modo que o potencial eólico precisa ser avaliado conforme cada instalação.

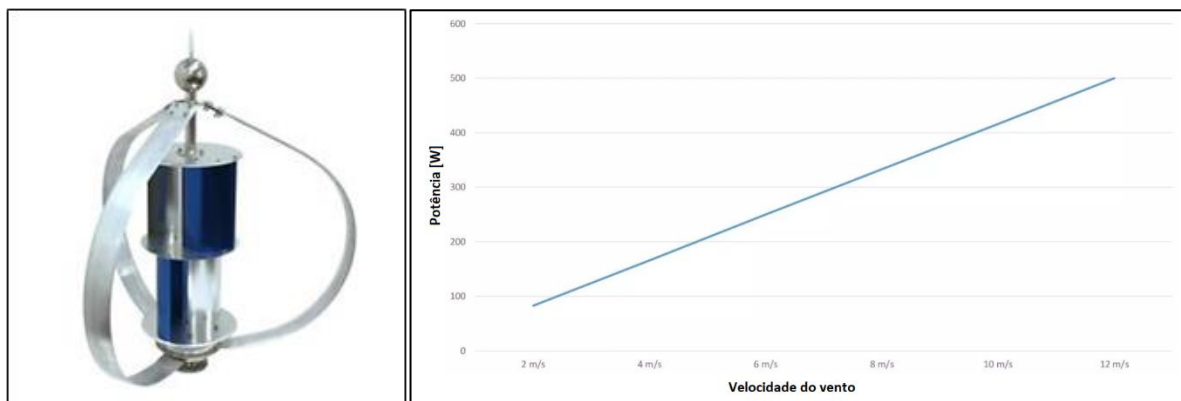


Figura 23 – Exemplo de modelo de turbina eólica de eixo vertical e sua curva de potência.

Fonte: (44)

Tomando-se como exemplo a região da Cidade Universitária de SP, o CRESESB estima que o vento médio na região é de 3,75 m/s, medido a 50 metros de altura. Combinando os dados

de distribuição de vento, a qual pode ser descrita por uma função de Weibull de parâmetros k anual 2,26 e c anual 4,23, com a curva de potência de opções comerciais de turbinas eólicas de pequeno porte, cuja potência e demanda de vento se adequam à aplicação (Figura 23)(44) instalada a 5 metros de altura (limitada para manter estabilidade da balsa), pode-se estimar uma potência média de 91,6 W. Supondo 85% de eficiência na conversão da potência AC em DC para armazenar nas baterias, resulta em 1,87 kWh acumulados por dia. Os detalhes podem ser observados no APÊNDICE A.

5.2. Flutuação e Estabilidade

A análise de flutuabilidade da balsa se dá por meio da estimativa do empuxo necessário para manter a embarcação flutuante sobre a lâmina d'água do reservatório. Para isso, considera-se que na situação de equilíbrio o empuxo gerado pelo volume do flutuador F_E instalado sob a plataforma da balsa seja igual ao peso total do conjunto F_P (Figura 24). Dessa forma, estima-se o volume imerso V_I necessário.

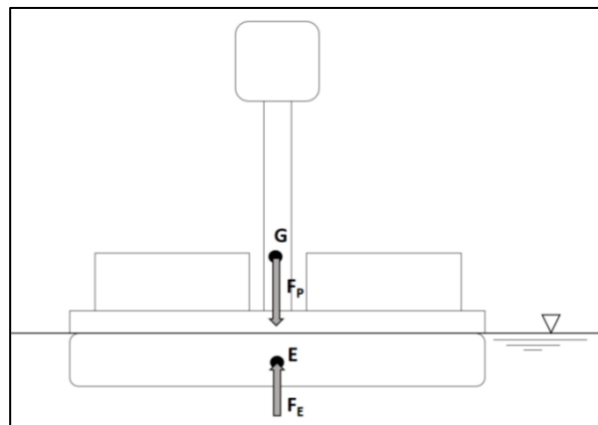


Figura 24 – Representações dos esforços para estudo da flutuabilidade e estabilidade.

Fonte: autoria própria

$$F_E = F_P \quad (4)$$

$$V_I = \frac{M_{\text{Total}}}{\rho_L} \quad (5)$$

Para uma massa total de 2 000 kg (estimativa inicial para arranjo de pequeno porte), e considerando a massa específica da água igual a $1\,000\text{ kg/m}^3$, é necessário um volume de 2 m^3 de flutuadores submersos para manter a balsa acima do nível do reservatório. O convés pode ser montado com dois módulos de deque flutuante de polietileno de $2,5 \times 1,5 \times 0,38\text{m}$ (45) que sustentam cerca de 1000kg cada. Pode-se encaixar mais módulos para obter área e flutuabilidade maiores, conforme a necessidade dos arranjos de maior porte.

A avaliação da estabilidade envolve o detalhamento da geometria do flutuador e determinação dos ângulos de oscilação da balsa. Para um modelo simplificado, considera-se:

- volume submerso contínuo;
- pequenos ângulos de inclinação da embarcação;
- o arrasto promovido pelo vento é relevante apenas no aerogerador.

A partir dessas hipóteses, o equilíbrio dos esforços ilustrados na Figura 25 possibilita a estimativa da velocidade máxima de vento para que a balsa não emborque, por meio da Equação (8).(46)

$$F_D = \frac{1}{2} \cdot C_D \cdot \rho_{ar} \cdot S \cdot U^2 \quad (6)$$

Onde F_D é a força de arrasto na turbina; C_D é o coeficiente de arrasto da turbina; ρ_{ar} é a massa específica do ar; S é a área projetada da turbina no plano perpendicular à direção principal do vento; e U é a velocidade média do vento na altura da turbina.

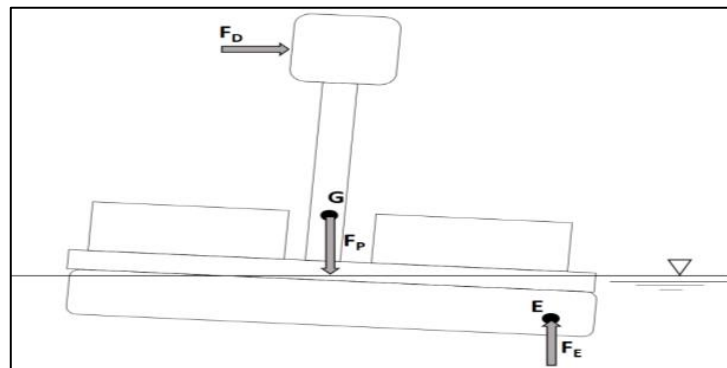


Figura 25 – Diagrama de esforços para estabilidade
Fonte: autoria própria

$$F_E = \frac{\gamma \cdot I_o \cdot \tan\theta}{L} \quad (7)$$

Onde F_E é a força de empuxo; γ é o peso específico da água; I_o é o momento de inércia da planta submersa; θ é o ângulo de inclinação da balsa; L é a distância entre o centro de massa da balsa e o ponto de aplicação da força que promove inclinação (será aproximado pela altura da turbina).

$$U^2 = \frac{2 \cdot \gamma \cdot I_o \cdot \tan\theta}{C_D \cdot \rho_{ar} \cdot S \cdot L} \quad (8)$$

Estabelecendo-se um valor limite para a inclinação θ , a equação (8) fornece a velocidade máxima tolerada pelo sistema.

O levantamento dos parâmetros é feito a partir de dados comerciais sobre os componentes do conjunto. Para os valores apresentados na Tabela 7, a velocidade limite para que o ângulo de rolagem da balsa não ultrapasse o valor estipulado é 25,9 m/s, muito superior aos valores de vento detectados nos levantamentos do CRESESB. Portanto, o risco de tombamento pelo vento é considerado mínimo para os arranjos trabalhados.

Tabela 7 – Parâmetros para estudo da estabilidade

Parâmetro	Valor
Peso específico da água	10 kN/m ³
Dimensões horizontais da balsa	2,5m x 3,0m
Momento de inércia da área planta da linha d'água	3,91 m ⁴
Ângulo de inclinação máximo da balsa	10°
Coefficiente de arrasto equivalente do rotor	3,5
Massa específica do ar	1,2 kg/m ³
Área projetada da pá do rotor	1,0 m ²
Distância entre o Centro de Massa e o ponto de aplicação do arrasto	5 m

5.3. Primeiro modelo

Existem diversas variáveis de arranjo que podem ser exploradas para otimizar o sistema conforme as diferentes condições de operação que se apresentarem, tais como número de painéis e baterias, ou modelos de turbina eólica, bomba e separadores, sistema de coleta e secagem, comprimento de tubulação, entre outros.

Para poder realizar uma comparação entre arranjos tão distintos, convém restringir o escopo para facilitar a visualização. Estabelecendo, por exemplo: regime eólico e solar médio anual da região da Cidade Universitária de SP; bombas da série BCS (centrífugas submersíveis) da fabricante Schneider; mangueiras de comprimentos variados conectando a um hidrociclone na margem; hidrociclones cilíndricos; turbina eólica de eixo vertical SD0117 (44) montada a 5m de altura; número de painéis solares de 2m² (42) suficiente para alimentar a bomba por cerca de 6 horas (um turno de trabalho, considerando reposicionamento da balsa e outras operações) por dia; número de baterias chumbo-ácido solares de 12 V, 240 Ah, 2,88kWh suficientes para energia para operar um turno com até 20% de profundidade de descarga; eficiência de 85% nas conversões de AC para DC e vice-versa, na passagem de energia acumulada nas baterias.

O modelo de hidrociclone foi escolhido para atender a faixa de vazão esperada, e o ponto de operação foi baseado em aproximações por polinômios de segundo grau das curvas das bombas (48), das mangueiras (49) e estimativa do hidrociclone conforme seus limites de operação (41). Assim, a pressão fornecida pela bomba pode ser expressa em função da vazão de operação conforme a equação (9).

$$H_B = a_B Q^2 + b_B Q + c_B \quad (9)$$

Onde H_B é a pressão fornecida pela bomba expressa em metros de coluna de água, Q é a vazão e a_B , b_B e c_B são coeficientes de ajuste da equação às curvas dadas pelos fabricantes.

Assumindo que a perda de carga nas mangueiras possa ser expressa por polinômio de segundo grau, segue a equação (10).

$$H_M = a_M Q^2 + b_M Q + c_M \quad (10)$$

Onde H_M é a perda de carga na mangueira e a_M , b_M e c_M são coeficientes de ajuste da equação aos valores encontrados na literatura (49) conforme o diâmetro nominal. Como os valores tabelados são para um comprimento de referência de 20 metros, adotou-se que os coeficientes seriam ajustados linearmente conforme o comprimento usado na instalação proposta.

De maneira similar, estipulou-se que a perda de carga no separador hidrociclone poderia ser expressa por um polinômio de segundo grau, usando como base os valores de vazão mínima e máxima e os valores de perda de carga mínima e máxima. Chegou-se à Equação (11)

$$H_S = a_S Q^2 + b_S Q + c_S \quad (11)$$

Onde H_S é a perda de carga no separador e a_S , b_S e c_S são os coeficientes de ajuste.

Adotando-se ainda que a saída do sistema precise estar a uma altura h acima do nível da água para ser lançada em um tanque de decantação ou outro dispositivo de separação, o ponto de operação pode ser calculado como aquele em que a pressão fornecida pela bomba iguala a soma da altura h com as perdas de carga nas mangueiras e no separador, conforme a equação (12).

$$H_B = H_M + H_S + h \quad (12)$$

Os coeficientes dos polinômios de segundo grau foram obtidos pelo método dos mínimos quadrados para se adequar aos dados dos fornecedores dos componentes.

Substituindo as equações (9), (10), (11) na equação (12) e rearranjando os termos, a vazão de operação pode ser estimada pela equação (13).

$$Q = \frac{-b_B + b_S + b_M \pm \sqrt{(-b_B + b_S + b_M)^2 - 4(a_B - a_S - a_M)(c_B - c_S - c_M - h)}}{2(a_B - a_S - a_M)} \quad (13)$$

A partir da vazão calculada estima-se a potência de operação pelas curvas da bomba. Multiplicando-se a potência consumida pelo tempo aproximado de 6 horas de operação por dia e considerando as perdas cabíveis chega-se à quantidade de painéis fotovoltaicos necessários para coletar a energia necessária e a quantidade de baterias exigida para armazená-la.

Para ajuste da potência conforme a massa específica da mistura ρ_m , assumiu-se uma suspensão de areia de 2650 kg/m^3 com concentração volumétrica de 3%, que resulta em ρ_m $1049,5 \text{ kg/m}^3$. Então, em relação às curvas calculadas para água, a potência seguindo as curvas de catálogo deve ser multiplicada por um fator de correção de 1,0495.

Simulando as bombas da série BCS 220, para um valor de h de 3 metros estipulado para a altura de um tanque de decantação, os valores estimados para sua operação com diferentes comprimentos de tubulação são apresentados na Tabela 8.

Baseando-se nesses valores é possível estimar a quantidade de painéis solares fotovoltaicos e de baterias necessários para operar cerca de 6 horas por dia, bem como estimar a vazão diária de água com sólidos em suspensão. Tais valores são apresentados na Tabela 9.

Tabela 8 – Valores estimados da operação do sistema com bombas BCS 220

Modelo de Bomba	Modelo de Hidrociclone	Compr. de mangueira diâm.2" [m]	Potência de operação [kW]	Vazão [m ³ /h]	Vazão por potência [m ³ /kWh]
BCS 220 1/2 cv	SV 9	50	0,53	7,61	14,42
		100	0,51	6,21	12,1
BCS 220 1 cv	SV 13	50	0,90	12,83	14,32
		100	0,85	10,33	12,09
		150	0,82	8,51	10,34
BCS 220 2 cv	SV 13	50	1,44	15,84	11,03
		100	1,37	12,98	9,46
		150	1,33	10,92	8,24
		200	1,29	9,34	7,24
BCS 220 3 cv	SV 13	100	1,43	15,41	10,80
		200	1,34	11,50	8,59
		300	1,28	9,02	7,03

Tabela 9 – Dimensionamento da parte energética do sistema para bombas BCS 220

Modelo de Bomba	Modelo de Hidrociclone	Compr. de mangueira diâm.2" [m]	Qtd. painéis solares	Qtd. Baterias 12V 240Ah	Tempo de oper. [h/dia]	Água+part. bombeada [m³/dia]	% energia eólica
BCS 220 1/2 cv	SV 9	50	1	6	4,92	37,4	61%
		100	1	6	5,06	31,4	61%
BCS 220 1 cv	SV 13	50	3	10	5,14	65,9	35%
		100	3	10	5,39	55,6	35%
		150	3	10	5,59	47,6	35%
BCS 220 2 cv	SV 13	50	7	18	6,00	95,0	18%
		100	6	16	5,55	72,1	21%
		150	6	16	5,74	62,7	21%
		200	6	16	5,90	55,1	21%
BCS 220 3 cv	SV 13	100	7	18	6,04	93,1	18%
		200	6	16	5,69	65,4	21%
		300	6	16	5,93	53,5	21%

O convés de 3x2,5m estipulado nos cálculos de estabilidade acomodaria a área de 3 painéis de 2m² na horizontal (arranjos de até 1 cv), mas seria necessário acoplar mais módulos flutuantes para os arranjos maiores.

É possível estudar o uso de outros modelos de bomba, como os da série BCS 475, com capacidade maior. Devido à maior vazão, o separador usado é compatível com mangueiras de diâmetro maior, e a pressão mais alta permite bombear por tubulação mais longa, conforme mostra a Tabela 10.

Tabela 10 – Valores estimados da operação do sistema com bombas BCS 475

Modelo de Bomba	Modelo de Hidrociclone	Compr. de mangueira diâm.4" [m]	Potência de operação [kW]	Vazão [m³/h]	Vazão por potência [m³/kWh]
BCS475 3cv	SI 85	100	2,96	61,3	20,7
		200	2,78	51,3	18,5
BCS475 5cv	SI 85	100	3,83	68,9	18,0
		200	3,57	57,5	16,1
		300	3,41	50,3	14,8
BCS475 7,5cv	SI 85	200	4,63	64,6	14,0
		350	4,31	53,1	12,3
		500	4,11	45,9	11,2
BCS475 10cv	SI 85	200	5,66	71,5	12,6
		400	5,14	55,8	10,9
		600	4,84	47,0	9,70

Novamente segue-se com o cálculo das quantidades de painéis e baterias necessários para cada caso, cujos resultados estão na Tabela 11. Nota-se que o uso de mangueiras de diâmetro maior e separadores de maior porte diminuem a perda de carga, o que é um dos fatores que implica em um aumento na razão vazão de mistura bombeada por potência consumida.

Buscas pelos itens para o sistema mostram que há componentes disponíveis para montar uma balsa com bomba de até 1 cv de potência nominal com inversores DC-AC. Contudo, conversores para potências mais altas são incomuns no mercado, e podem exigir outras soluções mais elaboradas e custosas, como soft starter ou inversores com controle digital.

Tabela 11 – Dimensionamento da parte energética do sistema para bombas BCS 475

Modelo de Bomba	Modelo de Hidroc.	Compr. de mangueira diâm.4" [m]	Qtd. painéis solares	Qtd. Baterias 12V 240Ah	Tempo de oper. [h/dia]	Água+part. bombeada [m ³ /dia]	% energia eólica
BCS475 3cv	SI 85	100	16	37	5,96	365	9,0%
		200	15	35	5,99	307	9,5%
BCS475 5cv	SI 85	100	21	47	5,92	407	7,0%
		200	20	45	6,07	349	7,3%
		300	19	43	6,07	305	7,7%
BCS475 7,5cv	SI 85	200	26	57	5,98	387	5,7%
		350	24	53	5,96	317	6,2%
		500	23	51	6,00	276	6,4%
BCS475 10cv	SI 85	200	32	69	5,96	426	4,7%
		400	29	63	5,98	334	5,2%
		600	27	59	5,93	278	5,5%

Com arranjos de maior potência há também a necessidade de área maior para os coletores fotovoltaicos. Caso a área da balsa se torne inconvenientemente grande para manobrabilidade, podem-se estudar arranjos com parte dos painéis instalados na margem ou em balsa auxiliar e conectados ao desassoreador via cabos.

Supondo que na cidade universitária houvesse uma lagoa de estabilização como a de Jacaré (Tabela 2), com o desempenho estimado para os desassoreadores eólico-solares, vê-se que a taxa de deposição de sólidos na lagoa foi de 4700 m³ de lodo com 10% de teor de sólidos, ou cerca de 470 m³ de partículas. Supondo que o acúmulo tenha se dado ao longo de 10 anos (mais rápido que a média de 15 a 20 anos), a taxa de assoreamento é da ordem de 47 m³ de sólidos por ano.

Tomando-se uma bomba de 1cv com 50 metros de mangueira e supondo que a suspensão bombeada contenha 1,4% de sólidos (valor mínimo medido na Tabela 2), se forem considerados 230 dias de operação por ano (excluindo períodos de manutenção, fins de semana, férias, etc.) o sistema tem uma capacidade estimada de coletar 213 m³ de sólidos por ano, mais de quatro vezes a taxa de deposição da lagoa de Jacaré.

Ou seja, uma unidade conseguiria atender quatro instalações desse porte em regime de revezamento, anulando o assoreamento. No entanto, levaria mais de dois anos para remover todo o acúmulo de 10 anos. Como citado no item 3.2, o regime de trabalho deve ser ajustado conforme a latência necessária para sedimento no sistema de tratamento.

Se for considerar uma represa como o açude de Quixeramobim (5), nele foi relatada uma perda de 30% dos 54 milhões de m³ ao longo de aproximadamente 50 anos. Os açudes tendem a ter mais areia nos detritos depositados quando comparados com as lagoas de estabilização, mas assumindo por hipótese que o volume perdido também apresente 10% de sólidos, tem-se uma taxa de acúmulo de 32,4 mil m³ de partículas sólidas por ano.

Tomando-se um arranjo com bomba de 10 cv e 600 metros de mangueira, assumindo uma concentração média de 3% de sólidos na suspensão bombeada e um regime de operação mais intenso de 330 dias por ano, cada balsa coletaria cerca de 2772 m³ de sólidos por ano, o que implica na necessidade de 12 unidades cada uma com uma bomba de 10 cv para igualar a taxa de deposição do açude Quixeramobim. Por outro lado, para reverter a perda de volume útil já ocorrida, seriam necessárias 585 unidades trabalhando por cerca de 1 ano.

5.4. Segundo modelo

O primeiro modelo, embora suficiente para se ter estimativas preliminares, desconsidera alguns fenômenos importantes para o problema abordado. Em uma segunda iteração, mais elementos foram adicionados.

No primeiro modelo, a carga gravitacional no trecho de tubulação submerso foi desprezada sob a hipótese de que a massa específica da mistura transportada seria aproximadamente igual à do fluido envolvente. Porém, a operação do desassoreador implica em movimentar uma suspensão com concentração de sólidos mais alta que a da água ao redor, então cabe incluir um termo de carga para contabilizar a elevação da mistura do leito até a superfície do reservatório.

O equacionamento para obter o ponto de operação pode ser obtido a partir do balanço de energias: a diferença entre o fluxo de energia antes da admissão da bomba e na saída do separador é igual à potência fornecida pela bomba, descontando-se as perdas no trajeto. Isso está expresso na equação (14), e a Figura 26 apresenta um diagrama simplificado do modelo. A segunda saída do hidrociclone, que retorna para o reservatório, não aparece.

$$\rho_m g Q (H_B - H_S - H_M) = \rho_L g Q_L (h + h_L) + \rho_s g Q_s (h + h_L) - \rho_L g Q h_L \quad (14)$$

Em que ρ_m é a massa específica da mistura bombeada; g é a aceleração da gravidade; Q é a vazão volumétrica total; ρ_L é a massa específica do líquido; Q_L é a vazão volumétrica da porção líquida; h_L é a altura da lâmina líquida; ρ_s é a massa específica do sólido; Q_s é a vazão volumétrica da porção sólida. Note-se que o último termo utiliza ρ do líquido porque o líquido nas imediações da sucção está pressurizado pela coluna do líquido livre apenas, não da mistura.

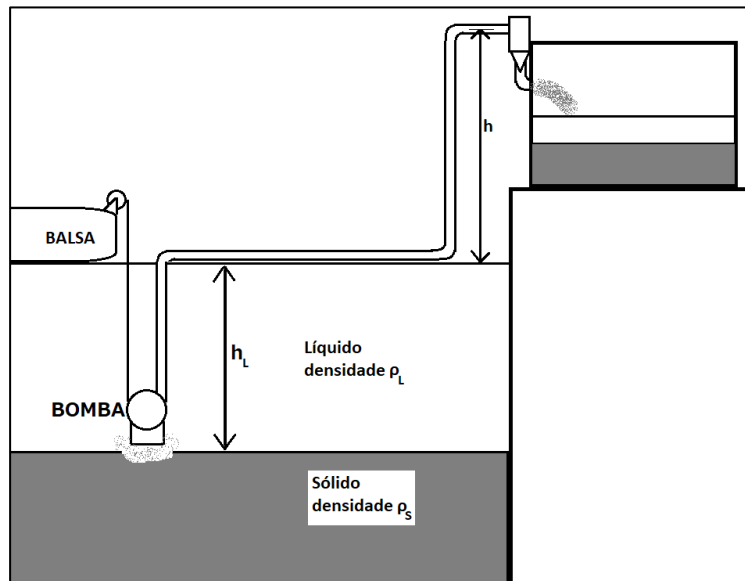


Figura 26 – Diagrama do sistema, destacando as cotas verticais a ser vencidas
Fonte: autoria própria

Utilizando a concentração volumétrica, é possível relacionar as massas específicas como expresso na equação (15).

$$\rho_m = \frac{\rho_s Q_s + \rho_L Q_L}{Q_s + Q_L} = \rho_s C + \rho_L (1 - C) \quad (15)$$

Durante a operação, conforme a sucção remove sedimentos, a profundidade h_L tende a mudar gradualmente. Este modelo assume como simplificação a hipótese de que se pode tomar um valor representativo constante sem comprometer por demais a capacidade de estimativa.

A concentração também pode variar conforme a bomba desce alcançando camadas mais fundas de sedimentos, que podem ter granulometrias e compactação diferentes. Também, a mudança na geometria da camada sólida pode mudar o perfil de velocidades, o cisalhamento, e a promoção de suspensão das partículas sólidas. Por ora, será considerado que é viável assumir um valor representativo de concentração que varia com a vazão apenas, desconsiderando a evolução da camada sólida.

Substituindo a equação (15) na (14) e simplificando alguns termos obtém-se a equação (16), que apresenta o balanço de energia do sistema em termos de coluna líquida.

$$H_B - H_S - H_M - h = \frac{(\rho_s - \rho_L)C}{\rho_L + C(\rho_s - \rho_L)} h_L \quad (16)$$

Aplicando na equação (16) o modelo de polinômio ordem 2 para a concentração, conforme equação (3), e rearranjando os termos, é possível obter um polinômio de grau 4 conforme apresentado nas equações (17) a (22) a seguir.

$$\alpha_4 Q^4 + \alpha_3 Q^3 + \alpha_2 Q^2 + \alpha_1 Q + \alpha_0 = 0 \quad (17)$$

$$\alpha_4 = a_C(\rho_s - \rho_L)(a_B - a_M - a_S) \quad (18)$$

$$\alpha_3 = (\rho_s - \rho_L)[b_C(a_B - a_M - a_S) + a_C(b_B - b_M - b_S)] \quad (19)$$

$$\alpha_2 = (\rho_s - \rho_L)[c_C(a_B - a_M - a_S) + b_C(b_B - b_M - b_S) + a_C(c_B - c_M - c_S - h - h_L)] + \rho_L(a_B - a_M - a_S) \quad (20)$$

$$\alpha_1 = (\rho_s - \rho_L)[b_C(c_B - c_M - c_S - h - h_L) + c_C(b_B - b_M - b_S) + \rho_L(b_B - b_M - b_S)] \quad (21)$$

$$\alpha_0 = c_C(\rho_s - \rho_L)(c_B - c_M - c_S - h - h_L) + \rho_L(c_B - c_M - c_S - h) \quad (22)$$

Note-se que, caso o ρ do líquido e do sólido sejam muito próximos, os termos $(\rho_s - \rho_L)$ se aproximam de zero, e a equação (17) pode ser simplificada para um polinômio de grau 2 cuja solução será similar à que foi apresentada na equação (13). Esse pode ser o caso de sedimentos orgânicos em lagoas de tratamento de esgoto, por exemplo. A mesma simplificação acontece se for assumida uma curva de concentração aproximadamente constante (a_C e b_C desprezíveis) e a profundidade da lâmina líquida h_L for desprezível. Tal propriedade evidencia que este segundo modelo é uma evolução, que admite mais características do sistema, sem invalidar o primeiro modelo.

Os coeficientes de curva de bomba, mangueira e separador continuam os mesmos do primeiro modelo, pois são baseados nos mesmos dados de fabricantes.

Por ora, a curva de concentração será baseada em dados esparsos dos relatórios de dragagem da Sabesp (14)(18). Para uma simulação mais criteriosa seria necessário levantar as curvas de concentração da suspensão conforme as características do reservatório a ser desassoreado e a faixa de vazões esperada.

O relatório da Sabesp para a dragagem experimental na lagoa facultativa de Mombuca indica apenas a vazão nominal da bomba de 35m³/h, que não corresponde ao ponto de operação efetivamente alcançado. Também não indica possíveis variáveis para correlacionar com a variação de concentração entre 1,3 e 5,2%. A curva inicial foi ajustada para passar pelos pontos indicados na Tabela 12. Como foram adotados apenas três pontos, tem-se uma solução exata, sem precisar de aproximação por mínimos quadrados.

Tabela 12 – Pontos selecionados para curva de variação da concentração bombeada conforme a vazão

Vazão [m ³ /h]	Concentração volumétrica [%]
7	2
35	5
70	7

Dessa forma, os coeficientes adotados são apresentados na Tabela 13.

Tabela 13 – Coeficientes do polinômio de segunda ordem da curva de concentração

Coeficiente	Valor
a _c	-7,9365e-6
b _c	1,4e-3
c _c	1,056e-2

E a curva adotada está representada na Figura 27 a seguir.

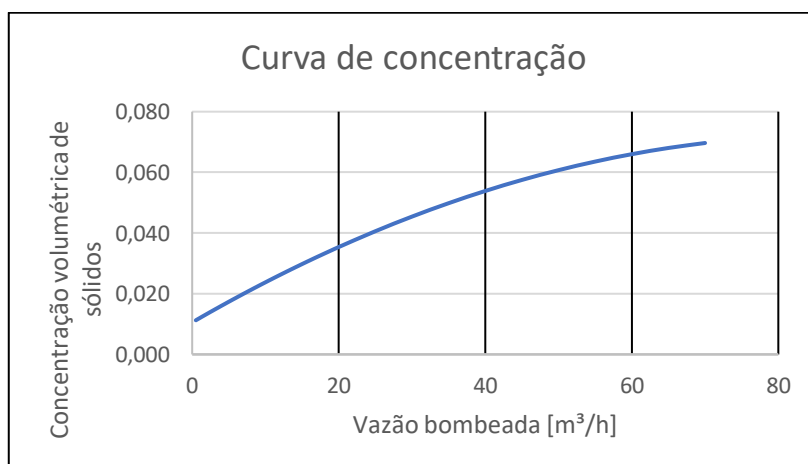


Figura 27 – Gráfico do modelo adotado para variação de concentração da mistura conforme a vazão
Fonte: autoria própria

O segundo modelo foi utilizado para estimar mais uma vez os pontos de operação dos arranjos usando bombas centrífugas submersíveis. Uma primeira iteração considerou prevalência de sólidos orgânicos leves, com ρ_s de 1100 kg/m³, 10% acima do ρ_L da água. Foi adotada profundidade da água h_L de 5 metros (representando lagoa de estabilização anaeróbia). Os resultados são apresentados na Tabela 14.

Tabela 14 – Pontos de operação para diferentes arranjos, calculados conforme o segundo modelo, considerando massa específica de sólidos ρ_s 1100 kg/m³ e profundidade h_L 5 metros

Modelo de Bomba	Modelo de Hidrociclone	Compr. de mangueira [m]	Vazão [m ³ /h]	Diferença de vazão com o primeiro modelo	Concentração volumétrica	ρ da mistura [kg/m ³]	Potência ajustada [kW]
BCS 220 1/2 cv	SV 9	50	7,60	-0,083%	2,1%	1002,1	0,53
		100	6,20	-0,095%	1,9%	1001,9	0,51
BCS 220 1 cv	SV 13	50	12,82	-0,068%	2,7%	1002,7	0,90
		100	10,32	-0,069%	2,4%	1002,4	0,86
		150	8,51	-0,071%	2,2%	1002,2	0,83
BCS 220 2 cv	SV 13	50	15,83	-0,053%	3,1%	1003,1	1,44
		100	12,98	-0,053%	2,7%	1002,7	1,38
		150	10,91	-0,053%	2,5%	1002,5	1,33
		200	9,33	-0,055%	2,3%	1002,3	1,29
BCS 220 3 cv	SV 13	100	15,40	-0,041%	3,0%	1003,0	1,43
		200	11,49	-0,041%	2,6%	1002,6	1,34
		300	9,02	-0,042%	2,3%	1002,3	1,29
BCS475 3cv	SI 85	100	61,20	-0,201%	6,7%	1006,7	2,98
		200	51,25	-0,183%	6,1%	1006,1	2,80
BCS475 5cv	SI 85	100	68,75	-0,173%	6,9%	1006,9	3,86
		200	57,41	-0,159%	6,5%	1006,5	3,59
		300	50,18	-0,149%	6,1%	1006,1	3,42
BCS475 7,5cv	SI 85	200	64,56	-0,139%	6,8%	1006,8	4,66
		350	53,07	-0,128%	6,3%	1006,3	4,34
		500	45,88	-0,119%	5,8%	1005,8	4,14
BCS475 10cv	SI 85	200	71,39	-0,118%	7,0%	1007,0	5,70
		400	55,75	-0,109%	6,4%	1006,4	5,17
		600	46,92	-0,101%	5,9%	1005,9	4,87

Lembrando que as bombas BCS 220 trabalham com mangueiras de 2 polegadas de diâmetro, enquanto as BCS 475 trabalham com 4 polegadas. Também, o comprimento de mangueira inclui o trecho submerso.

Como se pode notar, a proximidade entre as massas específicas do sólido e do líquido são tais que a diferença entre as previsões de vazão do primeiro e do segundo modelos são de até 0,2%, de modo que o primeiro modelo seria suficiente para realizar as estimativas.

Cabe ainda corrigir a potência consumida pela razão entre a massa específica da mistura e a da água, pois esta é usada para levantar as curvas de catálogo. Observa-se que, quanto maior a massa específica da suspensão, maior a parcela da carga “gasta” para erguer a coluna submersa e, portanto, menor a vazão e a potência de catálogo. Então existem efeitos com tendências opostas na variação da potência estimada.

Para se observar diferenças mais significativas, cabe outra iteração, considerando sólidos de massa específica mais alta. Por exemplo, areia apresenta cerca de 2650 kg/m³. Assume-se que a curva de concentração para areia seja similar à do lodo das lagoas de tratamento, apesar de suas propriedades serem bastante diferentes; mais dados experimentais seriam necessários para se trabalhar com uma curva mais verossímil. Simulando desassoreamento de areia a 5 m de profundidade h_L tem-se a Tabela 15.

Tabela 15 – Pontos de operação para diferentes arranjos, calculados conforme o segundo modelo, considerando ρ_s 2650 kg/m³ e profundidade h_L 5 metros

Modelo de Bomba	Modelo de Hidrociclone	Compr. de mangueira [m]	Vazão [m ³ /h]	Diferença de vazão com o primeiro modelo	Concentração volumétrica	ρ da mistura [kg/m ³]	Potência ajustada [kW]
BCS 220 1/2 cv	SV 9	50	7,51	-1,35%	2,1%	1034,0	0,54
		100	6,11	-1,53%	1,9%	1031,1	0,53
BCS 220 1 cv	SV 13	50	12,69	-1,10%	2,7%	1044,6	0,93
		100	10,21	-1,14%	2,4%	1039,6	0,89
		150	8,42	-1,11%	2,2%	1035,9	0,85
BCS 220 2 cv	SV 13	50	15,71	-0,84%	3,1%	1050,5	1,51
		100	12,88	-0,80%	2,7%	1045,0	1,43
		150	10,83	-0,85%	2,5%	1040,9	1,38
		200	9,26	-0,90%	2,3%	1037,7	1,34
BCS 220 3 cv	SV 13	100	15,31	-0,66%	3,0%	1049,7	1,50
		200	11,42	-0,67%	2,6%	1042,1	1,39
		300	8,96	-0,65%	2,2%	1037,1	1,33
BCS475 3cv	SI 85	100	59,48	-3,01%	6,6%	1108,5	3,25
		200	49,93	-2,75%	6,1%	1100,1	3,03
BCS475 5cv	SI 85	100	67,08	-2,59%	6,9%	1113,5	4,22
		200	56,13	-2,39%	6,4%	1105,8	3,91
		300	49,13	-2,24%	6,0%	1099,3	3,71
BCS475 7,5cv	SI 85	200	63,31	-2,07%	6,7%	1111,2	5,10
		350	52,12	-1,92%	6,2%	1102,2	4,72
		500	45,11	-1,80%	5,8%	1095,0	4,48
BCS475 10cv	SI 85	200	70,21	-1,77%	7,0%	1115,1	6,27
		400	54,90	-1,64%	6,3%	1104,8	5,64
		600	46,25	-1,53%	5,8%	1096,2	5,28

Com uma diferença de massa específica maior, os efeitos da ascensão das partículas sólidas na coluna submersa ficam mais perceptíveis, chegando à ordem de 3% de redução da vazão esperada em alguns casos. Também fica mais evidente a diferença na massa específica da mistura, e a conseqüente necessidade de correção da potência consumida.

Para investigar a influência da profundidade, foi realizada mais uma simulação considerando ρ da areia 2650 kg/m^3 e h_L de 25 metros, que pode representar desassoreamento de uma represa de água para consumo. Os resultados são apresentados na Tabela 16.

Tabela 16 – Pontos de operação para diferentes arranjos, calculados conforme o segundo modelo, considerando ρ_s 2650 kg/m^3 e profundidade h_L 25 metros

Modelo de Bomba	Modelo de Hidrociclone	Compr. de mangueira [m]	Vazão [m^3/h]	Diferença de vazão com o primeiro modelo	Concentração volumétrica	ρ da mistura [kg/m^3]	Potência ajustada [kW]
BCS 220 1/2 cv	SV 9	50	7,10	-6,7%	2,0%	1033,2	0,54
		100	5,73	-7,7%	1,8%	1030,2	0,52
BCS 220 1 cv	SV 13	50	12,14	-5,4%	2,6%	1043,5	0,92
		100	9,76	-5,5%	2,3%	1038,7	0,88
		150	8,03	-5,6%	2,1%	1035,1	0,84
BCS 220 2 cv	SV 13	50	15,18	-4,1%	3,0%	1049,5	1,49
		100	12,44	-4,1%	2,7%	1044,1	1,42
		150	10,46	-4,2%	2,4%	1040,1	1,37
		200	8,93	-4,4%	2,2%	1037,0	1,33
BCS 220 3 cv	SV 13	100	14,91	-3,3%	3,0%	1049,0	1,48
		200	11,12	-3,3%	2,5%	1041,5	1,39
		300	8,72	-3,3%	2,2%	1036,6	1,32
BCS475 3cv	SI 85	100	52,21	-14,9%	6,2%	1102,3	3,08
		200	44,39	-13,5%	5,7%	1094,2	2,90
BCS475 5cv	SI 85	100	59,96	-12,9%	6,6%	1108,9	4,02
		200	50,70	-11,8%	6,1%	1100,9	3,76
		300	44,70	-11,0%	5,7%	1094,5	3,59
BCS475 7,5cv	SI 85	200	57,94	-10,4%	6,5%	1107,3	4,92
		350	48,06	-9,6%	6,0%	1098,2	4,58
		500	41,83	-8,9%	5,5%	1091,1	4,37
BCS475 10cv	SI 85	200	65,11	-8,9%	6,8%	1112,3	6,06
		400	51,26	-8,2%	6,1%	1101,4	5,49
		600	43,40	-7,6%	5,6%	1093,0	5,16

Neste caso, a inclusão dos efeitos da coluna submersa e da concentração variante ficam bastante claros, chegando a cerca de 15% no desvio da vazão prevista. Nota-se que, se tomar um modelo de bomba da série BCS 475, o aumento de vazão tende a aumentar o desvio entre as previsões dos dois modelos apresentados; porém, essa tendência se inverte

para modelos da série BCS220. O comportamento varia conforme as características dos componentes usados e não é fácil estabelecer uma regra geral.

A partir dos pontos de operação estimados, pode-se repetir o exercício de dimensionamento das balsas adotando as mesmas condições do primeiro modelo: regime eólico e solar médio anual da região da Cidade Universitária de SP; bombas da série BCS (centrífugas submersíveis) da fabricante Schneider(48); mangueiras de comprimentos variados conectando a um hidrociclone na margem; hidrociclones cilíndricos; turbina eólica de eixo vertical SD0117 (44) montada a 5m de altura; número de painéis solares de 2m² (42) suficiente para alimentar a bomba por cerca de 6 horas (um turno de trabalho, considerando reposicionamento da balsa e outras operações) por dia; número de baterias de 12V, 240Ah, 2,88 kWh suficientes para acumular essa energia com até 20% de profundidade de descarga; eficiência de 85% nas conversões de AC para DC e vice-versa, na passagem de energia acumulada nas baterias.

Com o acréscimo do modelo de concentração, convém adicionar a estimativa do volume sólido e da massa de partículas sólidas bombeadas.

A Tabela 17 apresenta os valores calculados. Os valores entre parênteses mostram a variação entre as estimativas do primeiro modelo e as do segundo, seja em número de componentes, seja em termos de diferença percentual. A adição do modelo de concentração e da componente de emersão dos sólidos leva a uma redução da vazão e da potência na curva de catálogo; porém, ao se fazer a correção da potência consumida de acordo com a massa específica da mistura, o valor estimado é maior que o obtido pelo primeiro modelo. Mantendo-se o arranjo de coleta e armazenamento de energia, a média de energia disponível por dia permanece a mesma, e o tempo de operação diário diminui. A combinação de vazão e tempo de operação reduzidos naturalmente resulta na redução do volume total de mistura bombeada no dia.

Na maioria dos casos em que se tem menos de 15 painéis dimensionados pelo primeiro modelo, acrescentar um painel fotovoltaico ao arranjo do segundo modelo faz o tempo de operação passar das 6 horas de trabalho diárias, que foram estipuladas para um turno de trabalho por dia.

Tabela 17 – Dimensionamento de balsas conforme segundo modelo, considerando ρ_s 2650 kg/m³ e profundidade h_i 25 metros

Modelo de Bomba	Modelo de Hidroc.	Compr. de mangueira [m]	Qtd. painéis solares	Qtd. Bateria 12V 240Ah	Tempo de oper. [h/dia]	Água+part. bombeada [m ³ /dia]	Volume sólido bomb. [m ³ /dia]	Massa sólida bomb. [ton/dia]
BCS 220 1/2 cv	SV 9	50	1	6	4,81	34,1 (-8,7%)	0,69	1,82
		100	1	6	4,96	28,4 (-9,5%)	0,52	1,38
BCS 220 1cv	SV 13	50	3	10	4,99	60,5 (-8,1%)	1,60	4,23
		100	3	10	5,25	51,2 (-8,0%)	1,20	3,18
		150	3	10	5,45	43,8 (-8,0%)	0,93	2,47
BCS 220 2cv	SV 13	50	7	18	5,78	87,7 (-7,7%)	2,63	6,97
		100	6	16	5,36	66,7 (-7,4%)	1,79	4,73
		150	6	16	5,57	58,2 (-7,2%)	1,42	3,75
		200	6	16	5,73	51,2 (-7,1%)	1,15	3,04
BCS 220 3cv	SV 13	100	7	18	5,80	86,5 (-7,0%)	2,57	6,80
		200	6	16	5,50	61,1 (-6,5%)	1,54	4,07
		300	6	16	5,76	50,2 (-6,3%)	1,11	2,95
BCS 475 3cv	SI 85	100	16	37	5,73	299 (-15,5%)	18,5	49,1
		200	15	35	5,74	255 (-19,3%)	14,5	38,5
BCS 475 5cv	SI 85	100	22 (+1)	49 (+2)	5,89	353 (-13,2%)	23,3	61,7
		200	20	45	5,76	292 (-15,7%)	17,9	47,3
		300	19	43	5,76	258 (-14,5%)	14,8	39,1
BCS 475 7,5cv	SI 85	200	27 (+1)	59 (+2)	5,83	338 (-14,1%)	22,0	58,2
		350	25 (+1)	55 (+2)	5,83	280 (-12,5%)	16,7	44,2
		500	24 (+1)	53 (+2)	5,88	246 (-11,3%)	13,6	36,0
BCS 475 10cv	SI 85	200	34 (+2)	73 (+4)	5,90	384 (-9,8%)	26,1	69,2
		400	31 (+2)	67 (+4)	5,96	305 (-7,5%)	18,8	49,7
		600	29 (+2)	63 (+4)	5,95	258 (-9,1%)	14,6	38,6

5.5. Ajustes pela disponibilidade energética

Os arranjos apresentados nos itens 5.3 e 5.4 consideraram que o local de instalação teria os regimes solar e eólico da região da cidade universitária, e seus resultados foram comparados com dados de reservatórios de diferentes portes para avaliar a aplicação do desassoreador em instalações conhecidas.

Porém, conforme mencionado ao longo deste trabalho, o dimensionamento dos arranjos depende também da disponibilidade de energia no local de instalação.

Tomando por exemplo a região de Quixeramobim, no Ceará, que fica em uma região de clima distinto de São Paulo.

A Tabela 18 apresenta dados solarimétricos, enquanto a Tabela 19 apresenta dados eólicos da região.

Tabela 18 – Dados de irradiação solar fornecidos pelo CRESESB para medições próximas às coordenadas de Quixeramobim (5,2° S 39,25° W)

Lat. [°]	Lon g [°]	Dist [km]	Irradiação solar diária média [kWh/m ² .dia]												Média dia	Delta
			Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez		
5,20 1° S	39,2 5° O	4,9	5,47	5,50	5,64	5,17	5,10	4,91	5,28	6,03	6,45	6,46	6,37	5,82	5,68	1,55
5,20 1° S	39,3 5° O	6,2	5,51	5,57	5,65	5,17	5,12	4,94	5,28	6,03	6,49	6,53	6,43	5,87	5,72	1,59
5,10 1° S	39,2 5° O	11,9	5,33	5,44	5,53	5,09	5,05	4,96	5,29	6,08	6,55	6,48	6,32	5,73	5,65	1,60

Fonte: (27)

Tabela 19 – Dados eólicos do CRESESB, exemplo de Quixeramobim (coordenadas 05°11'56" S 39°17'34" O)

Atlas do Potencial Eólico Brasileiro		Dados de vento a 50 m de Altura				
Grandeza	Unidade	Dez-Fev	Mar-Mai	Jun-Ago	Set-Nov	Anual
velocidade média do vento	m/s	4,63	3,64	4,86	5,85	4,75
fator c	-	5,23	4,11	5,45	6,54	5,36
fator k	-	2,25	2,16	2,88	3,13	2,42
densidade de potência	W/m ²	104	52	101	168	106

Fonte: (28)

Os ventos e irradiação recebidos não alteram o ponto de operação das bombas, então as vazões esperadas continuam as mesmas apresentadas anteriormente. O que muda, principalmente, é a quantidade de painéis necessários para coletar energia suficiente para alimentar o sistema por cerca de 6 horas ao dia, uma vez que foi estipulado usar apenas uma turbina eólica por balsa. Também, como o número de painéis é discreto, isso altera o período médio de operação por dia, a quantidade de baterias necessárias, a vazão total diária e o percentual de energia eólica.

Considerando o mesmo modelo de painel fotovoltaico, a irradiação média de Quixeramobim fornece 1,49kWh/dia.painel (26% mais que em SP), e o mesmo modelo de turbina fornece 2,61kWh/dia (40% mais que em SP) às baterias.

A Tabela 20 apresenta o dimensionamento dos arranjos considerando o clima da região de Quixeramobim e um reservatório com sólidos de massa específica 2650 kg/m³ depositados a

profundidade de 25 metros; e a comparação desses resultados com os obtidos para clima da região da cidade universitária de São Paulo.

Tabela 20 – Dimensionamento de balsas conforme segundo modelo, considerando ρ_s 2650 kg/m³ e profundidade h_L 25 metros e regime eólico-solar de Quixeramobim

Modelo de Bomba	Modelo de Hidroc.	Compr. de mangueira [m]	Qtd. painéis solares	Qtd. Bateria 12V 240Ah	Tempo de oper. [h/dia]	Água+part. bombeada [m ³ /dia]	% energia eólica
BCS 220 1/2 cv	SV 9	50	1	8 (+2)	6,46 (34,4%)	45,9	63,6% (2,4%)
		100	1	8(+2)	6,67 (34,4%)	38,2	63,6% (2,4%)
BCS 220 1cv	SV 13	50	2(-1)	10	5,15 (3,3%)	62,5	46,7% (12%)
		100	2(-1)	10	5,42 (3,3%)	52,9	46,7% (12%)
		150	2(-1)	10	5,63 (3,3%)	45,2	46,7% (12%)
BCS 220 2cv	SV 13	50	5(-2)	18	5,73 (-0,7%)	87,1	25,9% (7,5%)
		100	5(-1)	18	6,03 (12,4%)	75,0	25,9% (5,1%)
		150	4(-2)	15(-1)	5,33 (-4,3%)	55,7	30,4% (9,6%)
		200	4(-2)	15(-1)	5,49 (-4,3%)	49,0	30,4% (9,6%)
BCS 220 3cv	SV 13	100	5(-2)	18	5,76 (-0,7%)	85,9	25,9% (7,5%)
		200	4(-2)	15(-1)	5,26 (-4,3%)	58,5	30,4% (9,6%)
		300	4(-2)	15(-1)	5,51 (-4,3%)	48,0	30,4% (9,6%)
BCS 475 3cv	SI 85	100	13(-3)	39(+2)	6,06 (5,9%)	317	11,9% (2,9%)
		200	12(-3)	36(+1)	6 (4,7%)	267	12,7% (3,2%)
BCS 475 5cv	SI 85	100	17(-5)	49	5,91 (0,4%)	354	9,3% (2,6%)
		200	16(-4)	46(+1)	5,98 (3,8%)	303	9,9% (2,5%)
		300	15(-4)	44(+1)	5,92 (2,7%)	265	10,4% (2,8%)
BCS 475 7,5cv	SI 85	200	21(-6)	59	5,86 (0,5%)	339	7,7% (2,2%)
		350	20(-5)	57(+2)	6,02 (3,3%)	289	8% (2,1%)
		500	19(-5)	54(+1)	6,02 (2,4%)	252	8,4% (2,3%)
BCS 475 10cv	SI 85	200	27(-7)	75(+2)	6,01 (2%)	391	6,1% (1,6%)
		400	24(-7)	67	5,94 (-0,2%)	305	6,8% (1,9%)
		600	22(-7)	62(-1)	5,83 (-2%)	253	7,4% (2,2%)

Note-se que a diferença na vazão diária se deve à mudança no tempo de operação e, portanto, a comparação percentual de ambas as colunas com os resultados de São Paulo é a mesma. A potência maior obtida pela turbina implica em uma maior participação da energia eólica que, junto com a potência maior captada pelos painéis, leva a uma necessidade de menos painéis para suprir as necessidades do desassoreador. Alguns casos permitiram a instalação de mais baterias e aumento do tempo de operação ainda se mantendo próximo das 6 horas por dia.

5.6. Turbulência e suspensão

A inclusão do termo h_L no segundo modelo computa a pressão necessária para erguer as partículas suspensas do leito até a superfície

Uma das preocupações ao se projetar um sistema de transporte de suspensão é a possibilidade de que o material suspenso decante e acabe se acumulando no meio do trajeto, podendo reduzir a eficiência do transporte ou causar o entupimento da tubulação.

Uma forma de evitar esse fenômeno é ter um escoamento turbulento na tubulação, de modo que as componentes transversais de velocidade mantenham a agitação do particulado e impeçam que haja a deposição.

Tipicamente, o regime do escoamento dentro de tubulações é verificado pelo diagrama de Moody, que se utiliza do número de Reynolds como parâmetro principal, conforme se vê na equação (24)(46).

$$Re = \frac{\rho U D}{\mu} \quad (23)$$

Onde Re é o número de Reynolds, ρ é a massa específica do fluido transportado, U é a velocidade média do fluido, D é o diâmetro da tubulação e μ é a viscosidade dinâmica do fluido. Para escoamentos dentro de tubulações, é comum assumir que um número de Reynolds acima de 3000 indica um regime turbulento.

Os valores do número de Reynolds calculados para os casos previstos para o segundo modelo utilizando sedimentos orgânicos e profundidade de 5 metros são apresentados na Tabela 21.

Este levantamento considerou que a viscosidade dinâmica da mistura bombeada seria igual à da água a 25°C, apesar de que ela tende a variar com a composição da suspensão. Porém, nota-se que os valores de Reynolds estão acima de $4,8 \times 10^4$, ou 16 vezes acima do valor de referência para o regime turbulento. Desse modo, mesmo que a viscosidade aumente cerca de 10 vezes, o regime ainda tende a se manter turbulento e evitar a deposição no meio da tubulação. Observando também a velocidade com que uma partícula desce quando mergulhada em um meio fluido, denominada velocidade terminal de descida, os valores típicos para areia são inferiores a 0,3m/s (50), menos da metade dos valores estimados para os arranjos estudados. No caso de particulado com massa específica mais próxima da do

fluido, tal como sedimento orgânico, a tendência é apresentar velocidades terminais ainda mais baixas.

Portanto, as estimativas mostram que a suspensão tende a não se desfazer no meio da tubulação, seja nos trechos verticais, seja nos horizontais.

Tabela 21 – Número de Reynolds para pontos de operação de diferentes arranjos, calculados conforme o segundo modelo, considerando ρ_s 1100 kg/m³ e profundidade h_L 5 metros

Modelo de Bomba	Visc. Dinâmica [kg/(m.s)]	Diâmetro da mangueira [m]	Compr. de mangueira [m]	Vazão [m ³ /h]	ρ da mistura [kg/m ³]	Veloc. Média de esc. [m/s]	Reynolds
BCS 220 1/2 cv			50	7,60	1002,1	1,04	5,96E+04
			100	6,20	1001,9	0,85	4,86E+04
BCS 220 1 cv			50	12,82	1002,7	1,76	1,01E+05
			100	10,32	1002,4	1,41	8,09E+04
			150	8,51	1002,2	1,17	6,67E+04
BCS 220 2 cv		0,0508	50	15,83	1003,1	2,17	1,24E+05
			100	12,98	1002,7	1,78	1,02E+05
			150	10,91	1002,5	1,50	8,56E+04
			200	9,33	1002,3	1,28	7,32E+04
BCS 220 3 cv	0,00089		100	15,40	1003,0	2,11	1,21E+05
			200	11,49	1002,6	1,57	9,01E+04
			300	9,02	1002,3	1,24	7,07E+04
BCS475 3cv			100	61,20	1006,7	2,10	2,41E+05
			200	51,25	1006,1	1,76	2,02E+05
BCS475 5cv			100	68,75	1006,9	2,36	2,71E+05
			200	57,41	1006,5	1,97	2,26E+05
			300	50,18	1006,1	1,72	1,97E+05
BCS475 7,5cv		0,1016	200	64,56	1006,8	2,21	2,54E+05
			350	53,07	1006,3	1,82	2,09E+05
			500	45,88	1005,8	1,57	1,80E+05
BCS475 10cv			200	71,39	1007,0	2,45	2,81E+05
			400	55,75	1006,4	1,91	2,19E+05
			600	46,92	1005,9	1,61	1,85E+05

5.7. Regime de trabalho

O modo de operação da bomba inicialmente se dará de forma similar ao que é praticado na dragagem de lagoas de estabilização: o operador posiciona a balsa sobre um ponto do leito que está assoreado; submerge a bomba até alcançar os sedimentos; a bomba é ligada e descida gradualmente, conforme os sedimentos vão sendo aspirados; quando se chega a

uma profundidade pré-estabelecida, a bomba é desligada, içada, e a balsa é reposicionada, dando início à próxima iteração.

Existem muitas variáveis ainda precisam ser mapeadas experimentalmente, e que influenciam o ritmo de trabalho que poderá ser empregado. Quando a sucção da bomba está em uma região em que os sedimentos estão razoavelmente nivelados, é de se esperar que o escoamento perturbe uma região aproximadamente circular do leito, e a escavação começaria com aspecto cilíndrico. À medida que a escavação progride, a água que desce para preencher a vala formada arrasta sólidos consigo que, sob a hipótese de simetria, acabaria gerando um formato que tende mais para tronco de cone, como ilustrado na Figura 28.

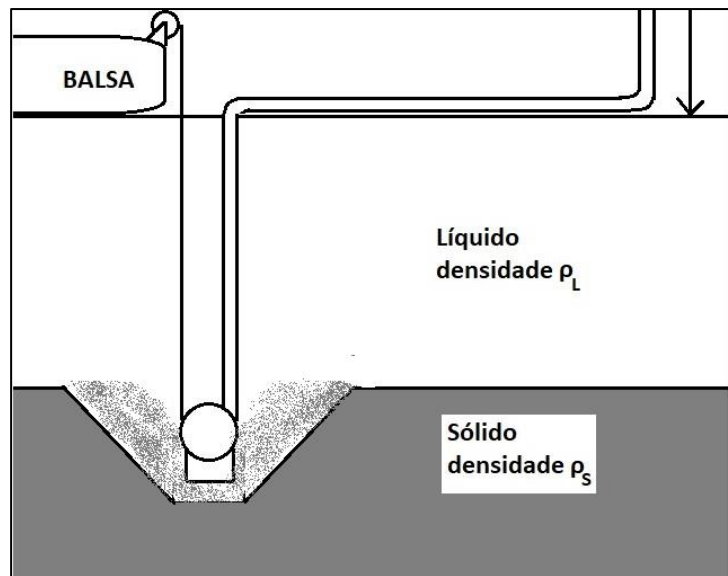


Figura 28 – Diagrama ilustrando a vala escavada pelo bombeamento
Fonte: autoria própria

O tempo gasto para a bomba descer da superfície inicial do leito assoreado até a profundidade prescrita seria estimado dividindo o volume da vala pela vazão de sólidos estimada, corrigindo pelo teor de partículas sólidas depositadas no leito (por exemplo, a Sabesp considera que o lodo depositado em lagoas de estabilização tem em média 10% de teor de sólidos (14)(18)).

Porém, a geometria da vala escavada é uma incógnita, depende da vazão da suspensão conforme a bomba submerge, e a vazão depende da concentração de sólidos, da profundidade h_L que vai variando, entre outros fatores. Supondo que o formato se aproxime de tronco de cone, a incógnita se resume ao ângulo de inclinação da encosta da vala.

Para se ter um valor inicial com o qual se possa basear as estimativas, recorre-se aos estudos sobre ângulo de repouso de materiais granulares, que trata da inclinação resultante quando se cria uma pilha de materiais como areia, cascalho, farinha, etc. (51)

Um desvio considerável entre a situação ora abordada e os valores da literatura é que o ângulo de repouso, como o nome indica, é medido para pilhas de material em equilíbrio estático, geralmente expostas ao ar, enquanto o leito está submerso e o escoamento bombeado é uma perturbação dinâmica. Ainda assim, considera-se que seja uma fonte válida para um valor preliminar para cálculo de estimativas. A Tabela 22 apresenta valores encontrados na literatura para ângulos de repouso.

Tabela 22 – Ângulos de repouso

Material (condição)	Ângulo de repouso	Material (condição)	Ângulo de repouso
Areia (cheia de água)	15 - 30°	Farinha (milho)	30 - 40°
Areia (molhada)	45°	Farinha (trigo)	45°
Areia (seca)	34°	Giz	45°
Argila (aglomerado seco)	25 - 40°	Granito	35 - 40°
Asfalto (moído)	30 - 45°	Grãos de café (fresco)	35 - 45°
Casca de árvore (refugo de madeira)	45°	Malte	30 - 45°
Cascalho (natural com areia)	25 - 30°	Neve	38°
Cascalho (pedra triturada)	45°	Sementes de trevo	28°
Cinzas	40°	Terra	30 - 45°
Coco (ralado)	45°	Trigo	27°

Fonte: traduzido e adaptado de GLOVER, 1997, apud AL-HASHEMI, 2018 (51)

Dentre a variedade de materiais listados, a que mais se aproxima de uma situação encontrada pelo desassoreador seria a de “areia cheia de água”, então assumir-se-á que a encosta da vala escavada teria entre 15° e 30° de inclinação.

O volume do cone pode ser calculado como pela Equação (24).

$$V = \frac{\pi l}{3} (R^2 + Rr + r^2) \quad (24)$$

Onde V é o volume do tronco de cone, l é a altura do cone (profundidade da vala), R é o raio da base maior e r é o raio da base menor.

Supondo que a base menor do tronco de cone tenha diâmetro igual ao diâmetro externo da região de sucção apresentado nos catálogos das bombas, o volume da vala em forma de tronco de cone teria valores dependendo da profundidade escavada, conforme apresentado na Tabela 23.

Tabela 23 – Volume da vala escavada

		Volume da vala [m ³]									
		Profundidade escavada [m]									
Bomba BCS	Diâmetro sucção [mm]	Ângulo de repouso	0,25	0,5	1	1,5	2	2,5	3	4	5
220	205	15°	0,31	2,14	15,8	52,0	121,6	235,5	404,7	952,8	1853
		30°	0,09	0,55	3,73	11,9	27,4	52,7	89,9	210,1	406,8
475	307	15°	0,36	2,31	16,5	53,4	124,0	239,3	410,2	962,6	1869
		30°	0,12	0,64	4,05	12,6	28,6	54,5	92,6	214,7	414,0

Destaca-se que o volume para uma encosta de inclinação 15° é cerca de três a quatro vezes maior que o valor para inclinação de 30°, e há uma variação não-linear conforme a profundidade. Isso significa que, supondo que todas as demais hipóteses estejam próximas da realidade, a incerteza na frequência com que o operador terá de reposicionar a balsa ainda é de mais de três vezes.

Tome-se, por exemplo, uma lagoa de estabilização assoreada com lodo orgânico de teor de sólidos 10%, a ser atendida por um arranjo de BCS 220 1 cv com 50 metros de mangueira. A vazão bombeada seria 12,14 m³/h com concentração 2,7% de sólidos, ou seja, 0,33 m³/h de partículas sólidas. Multiplicando o volume da vala pelo teor de sólidos, a quantidade de partículas a ser removida em um local que esteja com 1 m de assoreamento acima do tolerável seria de 0,373 a 1,58 m³, dependendo da inclinação da vala formada. Então, o período entre reposicionamentos da balsa estaria entre 1,1 e 4,8 horas.

Em um trecho que exige remoção de 0,5 m, o período entre reposições seria de 10 a 39 minutos, enquanto uma escavação de 1,5 m resultaria em período de 3,6 a 15,8 horas. Ou seja, o ritmo de trabalho também variará muito conforme a distribuição da camada de sedimentos acumulados, a qual tende a não ser uniforme, tipicamente formando montes e vales espalhados pelo leito.

Por já haver muitas incógnitas nestes levantamentos, o estudo considerou a operação das motobombas sob frequência nominal de catálogo, de modo que o ponto de operação acaba sendo determinado pelas condições da instalação. Quando os modelos de concentração de suspensão, ponto de operação e evolução da vala desassoreada estiverem consolidados, pode-se verificar junto aos manuais de fabricante os limites cabíveis para variar as características da alimentação em busca de um controle mais otimizado.

5.8. Propostas de trabalhos futuros

Este estudo apontou a necessidade de diversos levantamentos necessários para aprimorar seus modelos e permitir previsões mais precisas sobre seu modo de operação e desempenho efetivo. Há também uma série de pontos de melhoria que podem ser investigados conforme for acumulada mais experiência sobre este tipo de sistema.

Foram realizadas tentativas de obter financiamento para construção de protótipo, como na Chamada Pública da FINEP em 2019 (65), e no Pitch de soluções inovadoras da Sabesp em 2018. Porém, as propostas não foram aprovadas nas etapas finais.

Os subitens a seguir listam alguns dos pontos de interesse que se destacaram para estudos em etapas futuras.

5.8.1. Curva de concentração

O foco do sistema é a remoção das partículas sólidas do leito do reservatório, o que é diretamente influenciado pela concentração obtida na suspensão bombeada.

O modelo utilizado até o momento se baseou em resultados de experimentos de dragagem de lagoas de estabilização, que mediram concentrações aspiradas de 1,4 a 5,2% de partículas sólidas, com uma média de 3%. Porém, não estabeleceram uma correlação entre as variáveis de cada iteração e a concentração obtida, e trataram apenas da remoção de lodo orgânico.

O refinamento dessa parte do modelo exigiria a realização de experimentos de bombeamento do leito de interesse em diversas condições de vazão para averiguar se é possível estabelecer uma curva de concentração similar à apresentada na Figura 27, que possa aproximar o comportamento do sistema real e ser inserida no equacionamento para estimar os pontos de operação e a taxa de remoção de sólidos.

5.8.2. Evolução da operação

Os modelos foram elaborados tomando os valores no início da operação, assim que a bomba é mergulhada para se aproximar do leito. No entanto, conforme o fundo é aspirado, a profundidade h_L aumenta, e a geometria dos sedimentos ao redor da sucção se altera, o que pode modificar a concentração da suspensão e o ponto de operação.

As verificações experimentais devem incluir levantamento a respeito das variações temporais da de indicadores dos instrumentos, como potência da bomba. Mas caso seja inconveniente montar bancadas que permitam tomar medidas instantâneas de concentração, vazão e outras variáveis que venham a se mostrar relevantes, convém buscar uma modificação das equações para corrigir as previsões levando em conta, por exemplo, a profundidade inicial do leito h_L corrigida por fator que leve em conta a profundidade final desejada.

5.8.3. Vala escavada

O formato da vala escavada pela bomba ao remover os sólidos influencia o ritmo com que a balsa deve ser reposicionada e a distribuição de posições ao longo do leito em que a sucção será realizada.

Um estudo numérico utilizando ferramentas computacionais teria de trabalhar com a interação sólido-líquido da água, das partículas depositadas e suspensas, e da sucção da bomba se posicionando em relação ao leito. Isso já seria uma análise complexa, mesmo considerando um particulado homogêneo e bem definido. Na prática, o leito é assoreado com partículas diversas em material e granulometria, e suas características na parte de cima do leito podem ser diferentes daquelas encontradas mais próximo do fundo.

A informação que pode ser obtida junto com os experimentos citados anteriormente é a medição do volume aspirado e do aprofundamento obtido. Esses dados seriam usados para estimar a frequência de reposicionamentos.

Pode ser feita uma batimetria para registrar o relevo do leito, seguida de desassoreamento em pontos afastados tal que as valas não se sobreponham. Por fim, uma batimetria para estudar o formato resultante. Essas informações embasaria o planejamento da frequência e localização dos reposicionamentos da balsa.

5.8.4. Otimização dos arranjos

Os arranjos apresentados neste estudo consideram uso de peças comuns no mercado para simplificar a análise de componentes e focar o escopo no modelamento do escoamento. No entanto, o mercado de energias renováveis e micro redes tem prosperado com a busca por maior sustentabilidade, tal que é razoável assumir que alguns produtos ora incomuns virão a

se tornar mais abundantes e baratos, e que novas tecnologias serão disponibilizadas nos próximos anos.

Além da otimização do sistema de aproveitamento de energia usando inversor de duas vias, como citado no item 4.2.3, existem outras opções de hardware que podem ser estudadas para melhorar a eficiência do desassoreador.

A instalação dos equipamentos de coleta de energia na balsa foi pensada para dar mais autonomia para a unidade, mas existe a possibilidade de instalar os painéis e turbinas na margem, e alimentar as bombas por cabos longos e resistentes à água ou esgoto, possivelmente atendendo várias balsas com um conjunto de coleta centralizado. Isso pode trazer vantagens como a instalação dos painéis com inclinação e orientação ajustadas para maximizar a coleta conforme a época do ano, ou até usando sistema de rastreamento em tempo real. No entanto, isso implica em custos mais altos e, dependendo da vegetação e disposição do terreno, ter os painéis no meio do leito pode enfrentar menos sombreamento do que nas margens.

Quanto à turbina eólica, existem várias alternativas de modelos com curvas de potência distintas que podem ser mais ou menos proveitosas dependendo do regime de ventos do local. Para a instalação ora estudada foi escolhida uma turbina de eixo vertical 500 W que combina pás tipo Savonius e Darrieus, que aproveita razoavelmente as baixas velocidades previstas; mas um local com ventos mais rápidos poderia ser mais compatível com uma turbina de eixo horizontal de potência nominal mais alta, por exemplo.

O arranjo também considera apenas uma turbina a uma determinada altura. Para as balsas mais largas, ou ao estudar a instalação dos coletores na margem, pode-se averiguar o uso de mais turbinas, e instalações em alturas maiores para captar ventos de velocidades mais altas.

Quanto à parte de bombeamento, este estudo considerou o uso de bombas centrífugas submersas por serem parte das soluções de dragagem de pequeno porte vigentes. Conforme a evolução do sistema, é possível que outras soluções se mostrem mais promissoras como, por exemplo, uso de uma bomba mais potente instalada no deque da balsa, enquanto apenas o bocal de sucção é submerso.

Nota-se pelas tabelas com estimativas dos arranjos que o comprimento das mangueiras, além de determinar a distância que o sistema pode operar da margem, também influencia

no ponto de operação. Arranjos com mangueiras mais curtas se limitam a operar mais perto da margem com potências e vazões mais altas e, possivelmente, com concentrações de sólidos mais altas. Pode-se estudar a possibilidade de se ter mangueiras de comprimentos diferentes para trocar conforme a disponibilidade energética e a região do reservatório trabalhada (vide APÊNDICE C), ou o uso de trechos de mangueira com conectores para compor o comprimento total.

Cabe ainda reavaliar os arranjos conforme as eficiências reais dos componentes forem verificadas, o que pode aumentar ou reduzir o número necessário de baterias ou painéis.

6. CONCLUSÃO

O assoreamento é um fenômeno que deteriora naturalmente os reservatórios de água. Poderia ser desacelerado com gerenciamento adequado da vegetação e uso do terreno mas, de forma geral, tem se mostrado inevitável. Daí deriva a importância dos métodos para combater seus efeitos.

O problema do assoreamento pode se valer de soluções e metodologias mais focadas na sustentabilidade, e a partir disso desenvolveu-se um sistema inovador que promove a manutenção preventiva de longo prazo, em vez da corretiva emergencial; e que substitui o consumo de combustíveis fósseis por fontes renováveis eólica e solar fotovoltaica.

O uso de energias renováveis em utilidade local é uma alternativa que aproveita recursos sem depender da presença de usuários ou rede elétrica nas imediações.

Um regime de manutenção preventiva pode ainda permitir o aproveitamento dos sedimentos como um fornecimento regular de insumos, convertendo material de descarte em matéria-prima para indústria, na forma de areia para construção ou fabricação de blocos; ou para agricultura, na forma de matéria orgânica para fertilização.

Existem diversos arranjos que podem ser utilizados, empregando itens disponíveis no mercado selecionados e quantificados para cada aplicação. O dimensionamento da parte hidráulica, compreendida por bomba, separador e mangueiras, depende principalmente das características do reservatório, dos sedimentos e da concentração de partículas sólidas que se pode movimentar em suspensão. O dimensionamento da parte energética, composta por painéis fotovoltaicos, turbina eólica e baterias, depende da parte hidráulica e dos regimes solar e eólico no local de instalação.

A parte de movimentação de líquidos foi modelada com base em informações dos fornecedores de componentes, aproximadas por curvas polinomiais para simplificar o equacionamento do problema.

Ao estudar as formas de aspirar sólidos junto com líquido, evidenciou-se que há exemplos na literatura de trabalhos sobre as condições de escoamento necessárias para iniciar o deslocamento das partículas depositadas no leito, denominada *bed-load transport*; e as necessárias para a formação de suspensão de sólidos. Contudo, não foram encontradas correlações práticas para se estimar a concentração da mistura bombeada.

Foram tomados dados de regime eólico e solar nas coordenadas do campus São Paulo da Universidade de São Paulo, a partir dos quais se pôde levantar o potencial energético da região. Isso permite dimensionar o número de placas fotovoltaicas e ajustar a quantidade de baterias necessárias para o regime de trabalho estipulado. A turbina eólica foi mantida em altura fixa, e foi constatado que as dimensões adotadas para o sistema seriam tais que a chance de se tombar a balsa devido ao vento são baixíssimas.

O primeiro modelo físico do sistema considerou concentração de sólidos aspirada fixa, e a carga gravitacional apenas do trecho de tubulação acima da superfície. Seus resultados mostram que uma unidade equipada com uma bomba de 1cv e 50 metros de mangueira seria capaz de atender até quatro lagoas de estabilização ao longo do ano. Ao passo que, para um reservatório para consumo do porte de Quixeramobim, seriam necessárias 12 unidades equipadas com bombas de 10 cv para compensar a constante entrada de sedimentos na represa.

Operações de remoção do assoreamento acumulado exigiriam mais potência e tempo de trabalho, podendo ser inviável de utilizar este método dependendo da urgência da situação.

Portanto, destaca-se o aspecto de manutenção preventiva de longo prazo desta solução.

Um segundo modelo foi desenvolvido acrescentando uma curva de concentração extrapolando dados experimentais encontrados para dragagem de lodo orgânico; e incluindo o termo de carga gravitacional das partículas sólidas no trecho submerso. Seus resultados apontam um dimensionamento de arranjos similar ao obtido com o primeiro modelo, porém os pontos de operação e o regime de trabalho divergem quanto maior for a massa específica do sólido aspirado e a profundidade do leito.

No entanto, como o segundo modelo foi simulado baseando-se em uma curva que extrapola um conjunto de dados experimentais, ele se presta à observação de tendências do comportamento, mas não para o dimensionamento efetivo de máquinas a serem instaladas em campo. Experimentos serão necessários para calibrar as curvas dos modelos e fornecer previsões mais confiáveis.

A verificação quanto ao risco de deposição dos sedimentos ao longo da tubulação ou tamponamento dos trechos verticais mostraram que as velocidades e turbulências desenvolvidas estão até uma ordem de grandeza acima do que é teoricamente suficiente

para promover o transporte, o que indica uma baixa probabilidade de contratempos dessa natureza.

As estimativas acerca da frequência de reposicionamentos da balsa para varrer o leito evidenciaram outra incógnita do problema, que é o formato da vala escavada pela sucção dos sedimentos. O tempo que se leva para remover sedimentos até a profundidade desejada varia diretamente com o volume afetado pelo bombeamento. Dados de ângulo de repouso de material particulado molhado foram usados para uma primeira aproximação, mas a faixa de valores é larga, e essa informação se aplica a uma situação estática, não correspondendo muito bem ao problema dinâmico abordado.

Várias incertezas precisam ser averiguadas caso a caso conforme o reservatório a ser atendido a fim de aumentar a confiabilidade das estimativas.

Além das propostas para obter financiamento, as tentativas de ampliar a visibilidade do projeto envolveram apresentação de painel em congressos como o 16° COBEE (Congresso Brasileiro de Eficiência Energética) promovido pela ABESCO (Associação Brasileira das Empresas de Serviços de Conservação de Energia) em 2019, e o 26th International Congress on Mechanical Engineering (COBEM 2021) (66). Mas o protótipo não foi viabilizado.

Independentemente das incertezas do modelo, os regimes eólico e solar variam muito, principalmente em um país vasto como o Brasil. Isso deve ser estudado para cada local de instalação, para dimensionar a coleta e armazenamento de energia. Cabe uma abordagem preliminar usando dados interpolados de pontos próximos, mas o refinamento exige medições no local.

O aprimoramento dos modelos exige mais informações, dentre as quais se destacam: o comportamento da concentração da suspensão conforme as características do reservatório e o ponto de operação; a variação do ponto de operação conforme a bomba se aprofunda; a forma como a extração gera uma vala no leito. Esses pontos foram listados para ser verificados experimentalmente em trabalhos futuros.

Outro estudo futuro envolve a otimização dos arranjos conforme a realidade sobre seu funcionamento for verificada. A evolução da indústria de energias renováveis e micro redes tende a apresentar novidades nos próximos anos, o que gera mais uma possibilidade de atualização das alternativas viáveis para o sistema.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) AGÊNCIA NACIONAL DAS ÁGUAS, **GEO Brazil: water resources: components of a series of reports on the status and prospects for the Environment in Brazil: executive summary**. Brasília, 2007.
Disponível em
<https://www.ana.gov.br/arquivos/institucional/sge/CEDOC/Catalogo/2010/GEOBrasilResumoExecutivo_Ingles.pdf>. Acesso em novembro de 2018
- (2) **Which country has the most freshwater?** Disponível em
<<https://www.worldatlas.com/articles/countries-with-the-most-freshwater-resources.html>>.
Acesso em 18. Jan. 2019
- (3) AGÊNCIA NACIONAL DAS ÁGUAS, **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2018: informe anual**. Brasília, 2018.
- (4) NETO, J. C. C. **A crise hídrica no estado de São Paulo**. Geosp – Espaço e Tempo (Online), v. 19, n. 3, p. 479-484, mês. 2016. ISSN 2179-0892.
- (5) Diário do Nordeste, **Assoreamento reduz volume dos reservatórios no Ceará**. Mar 2017.
Disponível em <<http://diariodonordeste.verdesmares.com.br/editorias/regiao/assoreamento-reduz-volume-dos-reservatorios-no-ceara-1.1715220>>. Acesso em 14 jan. 2019
- (6) **Desperdício de água por assoreamento de reservatórios**. Disponível em
<<http://projects.mcrit.com/ceara/index.php/perdas-de-agua/assoreamento-de-barragens-e-acudes/298-assoreamento-de-barragens-e-acudes>>. Acesso em 14 jan. 2019
- (7) Correio da Paraíba, **Assoreamento de açudes prejudicará água do reservatório**. Jan 2018
Disponível em <<https://correiodaparaiba.com.br/cidades/agua/assoreamento-de-acudes-prejudica-aguas-do-reservatorio/>>. Acesso em 14 jan. 2019
- (8) Globo Rural, **Desastre ambiental no Pantanal de MS afeta curso de rio e vida de moradores**, disponível em <<http://g1.globo.com/economia/agronegocios/noticia/2016/05/desastre-ambiental-no-pantanal-de-ms-afeta-curso-de-rio-e-vida-de-moradores.html>> . Acesso em 20 de fevereiro de 2019.
- (9) Compre Rural, **ASSOREAMENTO DO RIO TAQUARI: DESASTRE AMBIENTAL NO PANTANAL**. Disponível em <<https://www.comprerural.com/assoreamento-do-rio-taquari-desastre-ambiental-no-pantanal-de-ms-gera-prejuizos-acima-de-1bi/>>. Acessado em 15 de dezembro de 2018
- (10) **Draga, conheça diferentes equipamentos**. Disponível em
<<https://allonda.com/blog/dragagem/draga-conheca-diferentes-equipamentos/>>. Acesso em 18 jan. 2019.
- (11) **Types of dredger – hydraulic dredger**. Disponível em <https://www.european-dredging.eu/Hydraulic_dredger>. Acesso em 18 jan. 2019

- (12) **Types of dredger – mechanical dredger.** Disponível em <https://www.european-dredging.eu/Mechanical_dredger>. Acesso em 18. Jan. 2019
- (13) HI-SEA DREDGE; **14-inch Cutter Suction Dredge**, disponível em <<http://www.hiseadredge.com/14-inch-cutter-suction-dredger>>, acessado em janeiro de 2019
- (14) COMPANHIA DE SANEAMENTO BÁSICO DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Remoção De Lodo Da Lagoa De Jacaré - Cabreúva - Composição De Custo**, 2005.
- (15) VAIANO, B., **Acidentes com barragens são um problema mundial e recorrente – que está piorando**, Super Interessante, 2019. Disponível em <<https://super.abril.com.br/ciencia/acidentes-com-barragens-sao-um-problema-mundial-e-recorrente-que-esta-piorando/>>, acessado em maio de 2019.
- (16) Samarco, **Aproveitamento de rejeitos**, disponível em <<https://www.samarco.com/aproveitamento-de-rejeitos/>>. Acessado em abril de 2019
- (17) Siegfried Karg Netto, engenheiro da Sabesp, informação verbal, discussão com o autor em março de 2018
- (18) COMPANHIA DE SANEAMENTO BÁSICO DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Remoção De Lodo De Lagoas De Estabilização**, 2004.
- (19) DEME Group, **VALE Dragagem e manutenção**. Disponível em <<https://www.deme-group.com/pt/dragabras/references/vale-dragagem-de-manutencao>>. Acessado em maio de 2019.
- (20) **Gerenciamento Ambiental das Dragagens de manutenção e aprofundamento do Porto de Santos.** Disponível em <<http://portal.antaq.gov.br/wp-content/uploads/2016/12/%E2%80%9CGerenciamento-Ambiental-das-Dragagens-de-Manuten%C3%A7%C3%A3o-e-Aprofundamento-no-Porto-de-Santos%E2%80%9D-Alexandre-Grota.pdf>>. Acessado em maio de 2019
- (21) TWEEDIE,N., **Is the world running out of sand? The truth behind stolen beaches and dredged islands**, The Guardian, Jul 2018. Disponível em <<https://www.theguardian.com/global/2018/jul/01/riddle-of-the-sands-the-truth-behind-stolen-beaches-and-dredged-islands>>. Acessado em abril de 2019.
- (22) WEILLER,R., **Sand Depletion**, Greenpeace 2018. Disponível em <<https://www.greenpeace.org/international/story/19351/sand-depletion/>>.Acessado em abril de 2019.
- (23) INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, **Inflação**, disponível em: <<https://ibge.gov.br/explica/inflacao.php>>. Acesso em 07 fev. 2023.

- (24) **Atlas Solarimétrico do Brasil – CRESESB.** Disponível em <<http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=publicacoes&task=livro&cid=2>>. Acesso em 26 abr. 2018.
- (25) **Matriz energética e elétrica**, Empresa de Pesquisa Energética, disponível em <<https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>>. Acessado em dezembro de 2022
- (26) SIMÕES MOREIRA, J.R., **Energias renováveis, geração distribuída e eficiência energética**, Ed. LTC, 2017
- (27) CRESESB, **Potencial Solar**, disponível em <<http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=sundata>>. Acessado em abril de 2018
- (28) CRESESB, **Potencial eólico**, disponível em <http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=atlas_eolico>. Acessado em abril de 2018.
- (29) CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELÉTRICA – CEPEL, **Atlas do Potencial Eólico Brasileiro: simulações 2013**. Rio de Janeiro, 2017.
- (30) Watt U Need; **Wind turbine Newmeil x-400**, disponível em <<https://www.wattuneed.com/en/wind-turbine/14829-wind-turbine-newmeil-x-400-0768563816222.html>>, acessado em fevereiro de 2023
- (31) COCHRAN,J.,KATZ,J., **Integrating variable renewable energy into the grid: key issues**, Greening the grid, disponível em <<https://greeningthegrid.org/resources/factsheets/integrating-variable-renewable-energy-into-the-grid-key-issues>>. Acessado em julho de 2019
- (32) GRUBB, M., **Renewables are cheaper than ever – so why are household energy bills only going up?**, The Conversation, 18 de janeiro de 2022. Disponível em <<https://theconversation.com/renewables-are-cheaper-than-ever-so-why-are-household-energy-bills-only-going-up-174795>>. Acessado em 22 de novembro de 2022
- (33) KIYOHARA,G.K., ZACHARIADIS,D.C., IMAMURA JÚNIOR,M.T., **Sistema e Aparato de Desassoreamento**, Pedido de exame de invenção submetido ao Instituto Nacional de Propriedade Industrial, BR 10 2020 016941 6, publicado em 19 de agosto de 2020
- (34) MATTOS,E.E., DE FALCO,R., **Bombas Industriais**, Ed. Interciência, 2ª edição, 1998
- (35) FOUAD,M.M., SHIHATA,L.A., MORGAN,E.I., **An integrated review of factors influencing the performance of photovoltaic panels**, Renewable and Sustainable Energy Reviews vol. 80, 2017, disponível em <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032117307803>>. Acessado em março de 2023.
- (36) Julio Romel Martinez Bolaños, pós-doutor em engenharia de sistemas de geração distribuída, informação verbal, discussão com o autor em fevereiro de 2023

- (37) Battery and energy Technologies, **Battery life (and death)**; Disponível em <<https://www.mpoweruk.com/life.htm>>. Acessado em setembro de 2019.
- (38) SMA Technologie AG, **Sunny Island 5048 Installation and Instruction Manual**, versão 2.1, SI5048-12:EE3107, 2007. Disponível em <https://www.energymatters.com.au/images/SMA/SI5048-11-EE3107_Prosa.pdf>. Acessado em fevereiro de 2023.
- (39) SOUTHARD,J., **Introduction to Fluid Motions, Sediment Transport, and Current-Generated Sedimentary Structures.**, 2006. Massachusetts Institute of Technology: MIT OpenCourseWare. Disponível em <<https://ocw.mit.edu/courses/earth-atmospheric-and-planetary-sciences/12-090-introduction-to-fluid-motions-sediment-transport-and-current-generated-sedimentary-structures-fall-2006/>>. Acessado em setembro de 2019
- (40) Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo, **Notas e aula GSA 0621 – Princípios de Geologia Sedimentar – Transporte de Sedimentos, 2014.** Disponível em <https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/3021458/mod_resource/content/2/Aula%203%20-%20formas%20de%20leito.pdf>. Acessado em outubro de 2019.
- (41) **Iavant sistemas de filtragem**, catálogo de separadores hidrociclone. Disponível em <https://www.iavant.com.br/pdf-catalogos/completo_solido.pdf>, acessado em novembro de 2018
- (42) Neosolar, **Painel Solar Fotovoltaico GCL-P6/72 330Wp** – Disponível em: <<https://www.neosolar.com.br/loja/painel-solar-fotovoltaico-gcl-p6-72-330wp.html>>. Acesso em 06 nov. 2018.
- (43) **Atlas do Potencial Eólico Brasileiro.** Disponível em <<http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=publicacoes&task=livro&cid=1>>. Acesso em 26 abr. 2018.
- (44) Cosmos Energias, **Turbina eixo vertical SD0117 500 W**, disponível em <<http://cosmosenergias.com.br/produto/turbina-eolica-vertical-400-w-sd-0117/>>, acessado em dezembro de 2018
- (45) **Smart Pier Produtos Inteligentes**, cotação enviada por correio eletrônico em janeiro de 2019, dados de contato pelo site <<http://www.smartpier.com>>.
- (46) WHITE, F. M., **Mecânica dos Fluidos**, Ed. Mc Graw Hill, 6ª edição, 2011.
- (47) **Savonius V3 DC Wind Turbine** – Disponível em <<https://piconauts.com/products/savonius-v3-dc-wind-turbine>>. Acesso em 06 nov. 2018.

- (48) Schneider Motobombas; **Curvas de operação das bombas centrífugas submersas**; disponível em <http://www.schneider.ind.br/produtos/motobombas-submers%C3%ADveis/submers%C3%ADveis/bcs/#Downloads>, acessado em dezembro de 2018
- (49) **Realflex mangueiras e mangotes**, tabelas de perda de carga por metragem de mangueira, disponível em <http://www.realflex.com.br/br/subpages/tabelas.php>, acessado em dezembro de 2018.
- (50) TALMON, A.M., **Settling Velocity of Solid Particle in a Liquid**, TU Delft Open Courseware, disponível em https://ocw.tudelft.nl/wp-content/uploads/C._oe4625_Intermezzo1.pdf, acessado em novembro de 2022
- (51) AL-HASHEMI, H.M.B., AL-AMOUDI, O.S.B., **A review on the angle of repose of granular materials**, Department of Civil and Environmental Engineering, King Fahd University of Petroleum and Minerals, Elsevier, 2018.
- (52) Mercado Livre, **Turbina Vertical 500 W**, disponível em https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-1130642690-turbina-eolica-vertical-500-w-_JM#eshop_BF%20IMPORTBRAZIL. Acessado em novembro de 2018
- (53) Casa São Paulo, **Bomba Centrífuga Submersível Schneider BCS-220 1cv 127V Monofásica**, disponível em www.acasasaopaulo.com.br/bomba-centrifuga-submersivel-schneider-bcs-220-1cv-127v-monofasica/p. Acessado em fevereiro de 2023
- (54) lavant sistemas de filtragem, **Tabela de preços**, disponível em <https://silو.tips/download/valida-a-parir-01fev-2017> . Acessado em novembro de 2018
- (55) Mercado Livre, **Mangueira Trançada Transparente Pt150 2 Polegadas 50 Metros**, disponível em https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-1137182717-mangueira-trancada-transparente-pt150-2-polegadas-50-metros-_JM?quantity=1#questions. Acessado em fevereiro de 2023
- (56) Neosolar, **Painel Solar Fotovoltaico 330W - OSDA - ODA330-36-P**, disponível em https://www.neosolar.com.br/loja/painel-solar-fotovoltaico-330w-osda-oda330-36-p.html?gclid=EAIaIQobChMIzvaatsuc_QIVGRXUAR0stgiTEAQYASABEgKymvD_BwE. Acessado em fevereiro de 2023
- (57) Mercado Livre, **Bateria Estacionaria Freedom Df4001 240ah Nobreak Painel Solar**, disponível em https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-2901615070-bateria-estacionaria-freedom-df4001-240ah-painel-solar-_JM#position=2&search_layout=stack&type=item&tracking_id=4b9fedde-f0bc-49e6-936e-60cd46bcf1b0. Acessado em fevereiro de 2023
- (58) Mercado Livre, **Viga De Madeira Cambará Bruta 5x15 - Cnm 5,00 Metros**, disponível em <https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-2701751697-viga-de-madeira-cambara-bruta-5x15->

- cnm-500-metros-_JM#position=11&search_layout=stack&type=item&tracking_id=59d75464-6689-4c0c-beac-4a8317f8a8da>. Acessado em fevereiro de 2023
- (59) AA Portable Power Corp., **Battery Management System (BMS) Kit for LiFePO4 Battery Pack - CPU w/CAN & Water resistant (#11591)**, disponível em <<https://www.batteryspace.com/advancedbmsbatterymanagementsystemfor1-24cellslionlifepo4pack.aspx>>. Acessado em fevereiro de 2023
- (60) Mercado Livre, **Inversor De Frequência 220v Monofásico 1cv 750w**, disponível em <https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-2140539870-inversor-de-frequncia-220v-monofasico-1cv-750w-_JM#position=3&search_layout=stack&type=item&tracking_id=cb6ea34c-cdca-45e5-8d20-db415d1647ae>. Acessado em fevereiro de 2023
- (61) Mercado Livre, **Inversor 5000w Conversor Entrada 24v Saida 220v Transforma**, disponível em <https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-887509877-inversor-5000w-conversor-entrada-24v-saida-220v-transforma-_JM?quantity=1#reco_item_pos=3&reco_backend=machinalis-seller-items&reco_backend_type=low_level&reco_client=vip-seller_items-above&reco_id=be8cbd49-2553-4c1d-9180-01901aae4493>. Acessado em fevereiro de 2023
- (62) Mercado Livre, **Kit Solar Usina Completo 4 Painéis 335W**, disponível em <https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-3106835337-kit-solar-usina-completo-4-paineis-335w-_JM#position=8&search_layout=stack&type=item&tracking_id=e264e822-0c46-4421-bcb1-c7b3449e5a57>. Acessado em fevereiro de 2023.
- (63) Clima e Ambiente Soluções Meteorológicas, **Kit Registrador WeatherLink IP - k6555**, disponível em <<https://www.climaeambiente.com.br/prod,idproduto,4700609,estacao-meteorologica-kit-registrador-weatherlink-ip---k6555>>. Acessado em fevereiro de 2023
- (64) Clima e Ambiente Soluções Meteorológicas, **Estação Meteorológica Vantage PRO2 Davis (1000 metros) – Rad.Solar – K6162CANOUV**, disponível em <<https://www.climaeambiente.com.br/prod,idloja,23707,idproduto,3730067,estacao-meteorologica-estacao-meteorologica-vantage-pro2-davis---1000-metros----rad--solar---k6162canouv>>. Acessado em fevereiro de 2023
- (65) FINEP, **Chamada Pública MCTIC/FINEP Ação Transversal 01/2018**, disponível em <<http://www.finep.gov.br/chamadas-publicas/chamadapublica/631>>. Acessado em janeiro de 2019.
- (66) ABCM Associação Brasileira de Engenharia e Ciências Mecânicas, **Wind-solar desilter with autonomous renewable energy supply** , apresentado em painel no 26° COBEM, 2021, disponível em <<https://abcm.org.br/proceedings/view/COB2021/0278>>. Acesso restrito a participantes do evento. Acessado em junho de 2022.

APÊNDICE A. Cruzamento das curvas de regime eólico e de potência de turbinas

Os fornecedores de turbinas eólicas informam as velocidades inicial (ou cut-in, valor mínimo necessário para iniciar a geração de potência) e nominal (ou rated, valor em que alcança a potência máxima da turbina; a partir dessa velocidade, a potência cai ou se mantém constante); e também curvas de potência para informar o comportamento do equipamento nas velocidades intermediárias.

A turbina eólica adotada usa uma combinação de pás Savonius com 3 pás Darrieus de 1,4m de diâmetro, cuja curva informada é uma reta que vai do ponto (2 m/s; 80 W) até (12 m/s; 500 W), conforme mostrado na Figura 29.

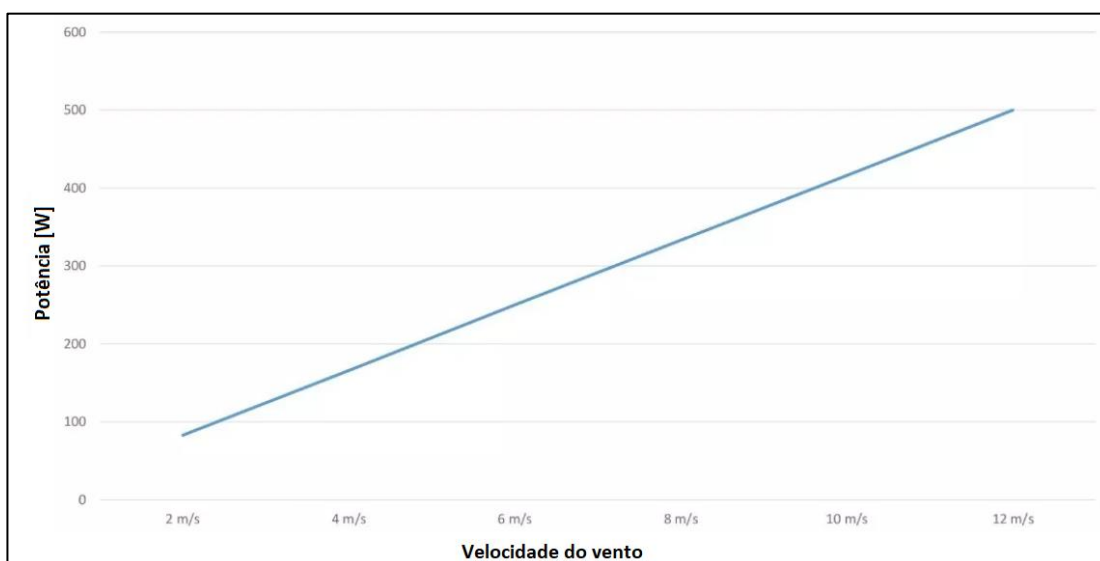


Figura 29 – Curva de potência de uma turbina de eixo vertical de 500 W
Fonte: adaptado de (52)



Figura 30 – Turbina de eixo vertical de 500 W
Fonte: (52)

Os regimes de vento podem ser representados estatisticamente por uma distribuição de Weibull, conforme Equação (2) (26) aqui reproduzida.

$$p(V) = \frac{k}{c} \cdot \left(\frac{V}{c}\right)^{k-1} \cdot \exp\left[-\left(\frac{V}{c}\right)^k\right] \quad (2)$$

Segundo o CRESESB (28), os coeficientes interpolados para as coordenadas do campus São Paulo da USP são apresentados na Tabela 24.

Selecionando-se diferentes valores de velocidade do vento V e inserindo os coeficientes k e c da localidade estudada, a Equação (2) fornece a probabilidade p de tal velocidade ocorrer ou, interpretando de outra forma, qual a porcentagem do tempo em que se tem essa velocidade.

Tabela 24 – Coeficientes da distribuição de Weibull do regime de ventos para coordenadas 23° 33' 34" S 46° 43' 26" O, referentes à cidade universitária da USP em São Paulo

Atlas do Potencial Eólico Brasileiro		Dados de vento a 50 m de Altura				
Grandeza	Unidade	Dez-Fev	Mar-Mai	Jun-Ago	Set-Nov	Anual
velocidade média do vento	m/s	3,11	3,7	4,2	3,97	3,75
fator c	-	3,51	4,18	4,73	4,48	4,23
fator k	-	2,14	2,21	2,48	2,34	2,26
densidade de potência	W/m ²	33	54	72	64	56

Fonte: adaptado de (28)

Esse cálculo é baseado nos dados fornecidos da distribuição de vento medida a uma determinada altura acima do solo. No caso do CRESESB, as medições usam uma referência de altura 50 metros. A correção para a altura da turbina eólica, conforme a Equação (1) aqui reproduzida.

$$V_H = V_0 \left(\frac{H}{H_0}\right)^n \quad (1)$$

Conforme mencionado no item 4.2, o coeficiente de rugosidade n selecionado é de 0,12, e a altura de instalação da turbina H é de 5 metros.

Aplicando as Equações (2) e (1), obtém-se a Tabela 25.

Ao tabelar uma faixa de velocidades, deve-se atentar para o passo entre cada valor de velocidade da tabela. Se a diferença entre os valores for de 1 m/s, não há necessidade de correções; porém, se for tentado um refinamento com passo $1/n$ m/s, onde n é um número natural, nota-se que a soma acumulada das probabilidades tende a $n \cdot 100\%$, há sobreposição entre as faixas de velocidade, de modo que se deve corrigir os cálculos de acordo. Para este estudo, foram considerados intervalos de 0,5 m/s, portanto, ao cruzar os valores de frequência f com a curva de potência da turbina, é necessário corrigir por um fator de 0,5.

Ao se multiplicar a frequência corrigida pela potência gerada pela turbina na velocidade corrigida para a altura de instalação, tem-se a contribuição dessa faixa de velocidade do vento para a potência média.

Tabela 25 – Distribuição de frequências de ocorrência de velocidades do vento*

V ₀ referência 50 m [m/s]	f (dez- fev)	f (mar- mai)	f (jun- ago)	f (set- nov)	f(anoal)	f acumulada (anoal)	V referência 5 m [m/s]
0,5	6,51E-02	4,01E-02	1,88E-02	2,75E-02	3,60E-02	3,60E-02	0,379
1	1,36E-01	8,98E-02	5,15E-02	6,80E-02	8,35E-02	1,19E-01	0,759
1,5	1,97E-01	1,38E-01	9,04E-02	1,12E-01	1,31E-01	2,51E-01	1,14
2	2,38E-01	1,78E-01	1,30E-01	1,52E-01	1,73E-01	4,24E-01	1,52
2,5	2,55E-01	2,06E-01	1,66E-01	1,85E-01	2,03E-01	6,27E-01	1,90
3	2,49E-01	2,19E-01	1,93E-01	2,06E-01	2,19E-01	8,46E-01	2,28
3,5	2,25E-01	2,17E-01	2,09E-01	2,14E-01	2,19E-01	1,07E+00	2,66
4	1,89E-01	2,02E-01	2,11E-01	2,08E-01	2,06E-01	1,27E+00	3,03
4,5	1,48E-01	1,78E-01	2,01E-01	1,91E-01	1,83E-01	1,45E+00	3,41
5	1,08E-01	1,49E-01	1,81E-01	1,66E-01	1,53E-01	1,61E+00	3,79
5,5	7,45E-02	1,18E-01	1,53E-01	1,37E-01	1,22E-01	1,73E+00	4,17
6	4,82E-02	8,87E-02	1,23E-01	1,07E-01	9,16E-02	1,82E+00	4,55
6,5	2,93E-02	6,35E-02	9,30E-02	7,89E-02	6,55E-02	1,89E+00	4,93
7	1,68E-02	4,33E-02	6,66E-02	5,54E-02	4,44E-02	1,93E+00	5,31
7,5	9,03E-03	2,82E-02	4,50E-02	3,69E-02	2,86E-02	1,96E+00	5,69
8	4,58E-03	1,74E-02	2,87E-02	2,34E-02	1,75E-02	1,98E+00	6,07
8,5	2,19E-03	1,03E-02	1,73E-02	1,40E-02	1,02E-02	1,99E+00	6,45
9	9,85E-04	5,77E-03	9,82E-03	7,98E-03	5,60E-03	1,99E+00	6,83
9,5	4,18E-04	3,09E-03	5,24E-03	4,30E-03	2,93E-03	2,00E+00	7,21
10	1,67E-04	1,57E-03	2,63E-03	2,20E-03	1,46E-03	2,00E+00	7,59
10,5	6,26E-05	7,62E-04	1,24E-03	1,06E-03	6,85E-04	2,00E+00	7,97
11	2,22E-05	3,52E-04	5,50E-04	4,87E-04	3,06E-04	2,00E+00	8,34
11,5	7,38E-06	1,55E-04	2,28E-04	2,11E-04	1,29E-04	2,00E+00	8,72
12	2,31E-06	6,47E-05	8,87E-05	8,62E-05	5,19E-05	2,00E+00	9,10
12,5	6,83E-07	2,57E-05	3,22E-05	3,33E-05	1,97E-05	2,00E+00	9,48
13	1,89E-07	9,74E-06	1,10E-05	1,22E-05	7,07E-06	2,00E+00	9,86
13,5	4,95E-08	3,51E-06	3,48E-06	4,18E-06	2,41E-06	2,00E+00	10,2
14	1,21E-08	1,20E-06	1,03E-06	1,36E-06	7,74E-07	2,00E+00	10,6
14,5	2,80E-09	3,90E-07	2,83E-07	4,16E-07	2,36E-07	2,00E+00	11,0
15	6,09E-10	1,20E-07	7,26E-08	1,20E-07	6,77E-08	2,00E+00	11,4

*Deve-se atentar para a correção das frequências conforme o passo de velocidade

Cabe ainda a correção pela massa específica do ar: a potência captada pela turbina depende da energia cinética do vento incidente, que é proporcional à massa específica. Por padrão as informações de catálogo das turbinas consideram que o ar ao nível do mar tem 1,225 kg/m³. Com o aumento da altitude, a pressão ambiente diminui e a massa específica do ar também, de modo que

na altitude de São Paulo, de 730 metros, o ar apresenta cerca de $1,142 \text{ kg/m}^3$, representando uma redução de cerca de 7% em relação aos valores de catálogo.

Com essas considerações, pôde-se elaborar a Tabela 26.

Tabela 26 – Cruzamento dos dados de regime de ventos e potência da turbina eólica para obtenção da potência média

V ₀ referência 50 m [m/s]	V referência 5 m [m/s]	Pot. Turbina [W]	Pot*f (dez-fev)	Pot*f (mar- mai)	Pot*f (jun-ago)	Pot*f (set-nov)	Pot*f (anual)
0,5	0,379	0,0	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
1	0,759	0,0	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
1,5	1,14	0,0	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
2	1,52	0,0	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
2,5	1,90	0,0	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
3	2,28	85,4	1,06E+01	9,34E+00	8,26E+00	8,81E+00	9,34E+00
3,5	2,66	100,2	1,13E+01	1,09E+01	1,05E+01	1,07E+01	1,10E+01
4	3,03	115,1	1,08E+01	1,16E+01	1,22E+01	1,20E+01	1,19E+01
4,5	3,41	129,9	9,59E+00	1,16E+01	1,31E+01	1,24E+01	1,19E+01
5	3,79	144,8	7,83E+00	1,08E+01	1,31E+01	1,20E+01	1,11E+01
5,5	4,17	159,6	5,94E+00	9,40E+00	1,22E+01	1,09E+01	9,71E+00
6	4,55	174,5	4,20E+00	7,74E+00	1,07E+01	9,30E+00	8,00E+00
6,5	4,93	189,3	2,77E+00	6,01E+00	8,81E+00	7,47E+00	6,20E+00
7	5,31	204,2	1,71E+00	4,42E+00	6,80E+00	5,66E+00	4,54E+00
7,5	5,69	219,0	9,89E-01	3,08E+00	4,93E+00	4,05E+00	3,13E+00
8	6,07	233,9	5,36E-01	2,04E+00	3,36E+00	2,73E+00	2,05E+00
8,5	6,45	248,7	2,72E-01	1,28E+00	2,15E+00	1,74E+00	1,26E+00
9	6,83	263,6	1,30E-01	7,60E-01	1,29E+00	1,05E+00	7,38E-01
9,5	7,21	278,4	5,81E-02	4,30E-01	7,30E-01	5,99E-01	4,08E-01
10	7,59	293,3	2,44E-02	2,30E-01	3,86E-01	3,22E-01	2,13E-01
10,5	7,97	308,1	9,65E-03	1,17E-01	1,91E-01	1,64E-01	1,06E-01
11	8,34	323,0	3,58E-03	5,68E-02	8,88E-02	7,86E-02	4,94E-02
11,5	8,72	337,8	1,25E-03	2,61E-02	3,85E-02	3,56E-02	2,19E-02
12	9,10	352,7	4,08E-04	1,14E-02	1,56E-02	1,52E-02	9,14E-03
12,5	9,48	367,5	1,25E-04	4,73E-03	5,93E-03	6,12E-03	3,62E-03
13	9,86	382,4	3,62E-05	1,86E-03	2,09E-03	2,32E-03	1,35E-03
13,5	10,2	397,2	9,82E-06	6,96E-04	6,90E-04	8,31E-04	4,78E-04
14	10,6	412,1	2,50E-06	2,47E-04	2,12E-04	2,80E-04	1,60E-04
14,5	11,0	426,9	5,98E-07	8,32E-05	6,05E-05	8,88E-05	5,03E-05
15	11,4	441,8	1,34E-07	2,66E-05	1,60E-05	2,65E-05	1,50E-05
Pot. Média [W]			66,84	89,80	108,79	100,10	91,61

APÊNDICE B. Estimativas de custos de material

No estado atual há muitas incógnitas para se calcular de forma confiável todos os custos de implementação de um conjunto de desassoreadores e o rendimento resultante, principalmente com as incertezas sobre o regime de trabalho e a mão de obra envolvida na fabricação e operação das unidades, bem como os custos de manutenção do sistema. Dessa forma, uma comparação com os custos encontrados na literatura seria inadequada.

No entanto, a fim de simplificar e baratear a obtenção de materiais, foram elaboradas listas preliminares de componentes usando itens de prateleira, cujos preços podem ser encontrados em buscas pela internet.

Note-se que são informações de nível de projeto básico de protótipos, que ainda carecem de detalhamento, refinamento e ajustes, principalmente no caso de produção em maior escala.

Como exemplo ilustrativo, foram coletados preços de alguns componentes para uma balsa equipada com bomba BCS 220 1cv e 50 metros de mangueira de 2 polegadas, que estão listados na Tabela 27.

Tabela 27 – Custo parcial dos componentes para balsa com bomba BCS 220 1cv e 50 metros de mangueira 2”

Componente	Qtd.	Custo estimado	Referência
Motobomba BCS 220 1cv	1	R\$ 4.879,19	(53)
Hidrociclone sv13	1	R\$ 3.484,29	(54) ajustada pelo IPCA 02/2017-12/2022
50m de mangueira 2”	1	R\$ 2.472,00	(55)
Painéis solares 2m ²	3	R\$ 2.475,24	(56)
Bateria chumbo-ácido solar 12 V 240Ah	11	R\$ 21.989,00	(57)
Turbina eólica 500W	1	R\$ 3.985,00	(44)
Módulo Flutuante 3x2,5m	1	R\$ 9.661,12	(45) ajustada pelo IPCA 12/2018 – 12/2022
Viga de madeira para poste 5mx15cmx5cm	3	R\$ 600,00	(58)
BMS	1	R\$ 4.017,95	(59), considerando dólar a R\$5,21 e adicional 60% com taxa de importação
Conversor AC-DC 750 W (para turbina => bateria)	1	R\$ 529,90	(60)
Conversor DC-AC 5000 W (para bateria => bomba)	1	R\$ 1.849,99	(61)
Micro inversor 4 MPPT 1,34kW (para painel => bateria)	1	R\$ 3.428,68	(62), descontando valor de painéis que viriam inclusos
Datalogger	1	R\$ 4.500,00	(63)
Estação Meteorológica	1	R\$ 19.300,00	(64)
Total		R\$ 83.172,36	

APÊNDICE C. Variação sazonal da captação de energia

O dimensionamento da parte energética dos arranjos do desassoreador apresentados nos subitens 5.3 e 5.4 levaram em conta valores de média anual para os regimes solar e eólico. Porém, existem dados disponíveis das médias mensais de insolação solar, e trimestrais da distribuição de Weibull dos ventos, fornecidos pelo CRESESB (27) (28), que podem ser usados para refinar o estudo do comportamento da captação de energia ao longo de um ano típico. A Tabela 28 apresenta os dados de regime eólico e solar para as coordenadas da Cidade Universitária, campus São Paulo da USP.

Tabela 28 – Dados de regime eólico e solar para coordenadas do campus São Paulo da USP (coord. 23,5°S 46,749°O)

Ângulo	Incl	Irradiação solar diária média mensal [kWh/m ² .dia]											
		Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Plano Horizontal	0°N	5,25	5,53	4,73	4,21	3,46	3,19	3,29	4,26	4,26	4,77	5,19	5,77
Ângulo igual a latitude	24°N	4,74	5,26	4,86	4,78	4,29	4,17	4,19	5,07	4,53	4,65	4,76	5,11
Maior média anual	21°N	4,83	5,33	4,88	4,74	4,21	4,07	4,10	5,00	4,53	4,70	4,84	5,23
Maior mínimo mensal	34°N	4,39	4,97	4,74	4,83	4,47	4,41	4,40	5,21	4,48	4,44	4,42	4,69
Distribuição de ventos	fator c	3,51	3,51	4,18	4,18	4,18	4,73	4,73	4,73	4,48	4,48	4,48	3,51
	fator k	2,14	2,14	2,21	2,21	2,21	2,48	2,48	2,48	2,34	2,34	2,34	2,14
	Média [m/s]	3,11	3,11	3,7	3,7	3,7	4,2	4,2	4,2	3,97	3,97	3,97	3,11

Fonte: adaptado de (27)(28)

Nota-se que, para as coordenadas adotadas, a insolação tende a ser alta quando a média dos ventos é mais baixa, e vice-versa, o que pode significar uma boa complementaridade na captação combinada dos dois tipos de energia, contribuindo para estabilizar a média de energia disponível. Vale ressaltar que isso varia conforme o clima da região e não é uma regra geral.

Os arranjos até então tabelados consideraram apenas painéis instalados na horizontal sobre o convés do desassoreador, para simplificar o trabalho do operador ao reposicionar a balsa sem ter que se preocupar com a orientação em relação aos pontos cardeais. Diante da possibilidade de estudos futuros com painéis instalados na margem, que podem ser inclinados segundo a orientação que for mais promissora, pode-se estudar o potencial energético de outros arranjos.

Cada instalação tem um conjunto diferente de relevo e vegetação ao redor produzindo sombreamento que varia conforme a época do ano e a hora do dia, e seus efeitos podem variar de acordo com a inclinação dos painéis. Contudo, será usado o mesmo fator de eficiência de 80% no

aproveitamento para contabilizar sombreamento, desvio de temperatura e outras perdas, pois não há informação suficiente para estimar uma distinção.

Tomando-se um desassoreador dimensionado conforme a Tabela 17, equipado com uma bomba Schneider BCS220 1cv (48), três painéis fotovoltaicos de aproximadamente 2 m² cada e eficiência nominal 17% (42) instalados na horizontal, e uma turbina eólica de eixo vertical 500W instalada a 5 metros acima do convés (44). A captação de energia pode ser estimada para cada mês. Os resultados são apresentados na Tabela 29, e de forma gráfica na Figura 31.

Tabela 29 – Energia coletada pelo desassoreador com 3 painéis fotovoltaicos horizontais e 1 turbina eólica a cada mês

	Energia coletada [kWh/dia]												
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Méd
Solar	4,14	4,36	3,73	3,32	2,73	2,51	2,59	3,36	3,36	3,76	4,09	4,54	3,54
Eólica	1,60	1,60	2,16	2,16	2,16	2,61	2,61	2,61	2,40	2,40	2,40	1,60	2,19
Total	5,74	5,96	5,88	5,47	4,88	5,12	5,20	5,97	5,76	6,16	6,49	6,15	5,73

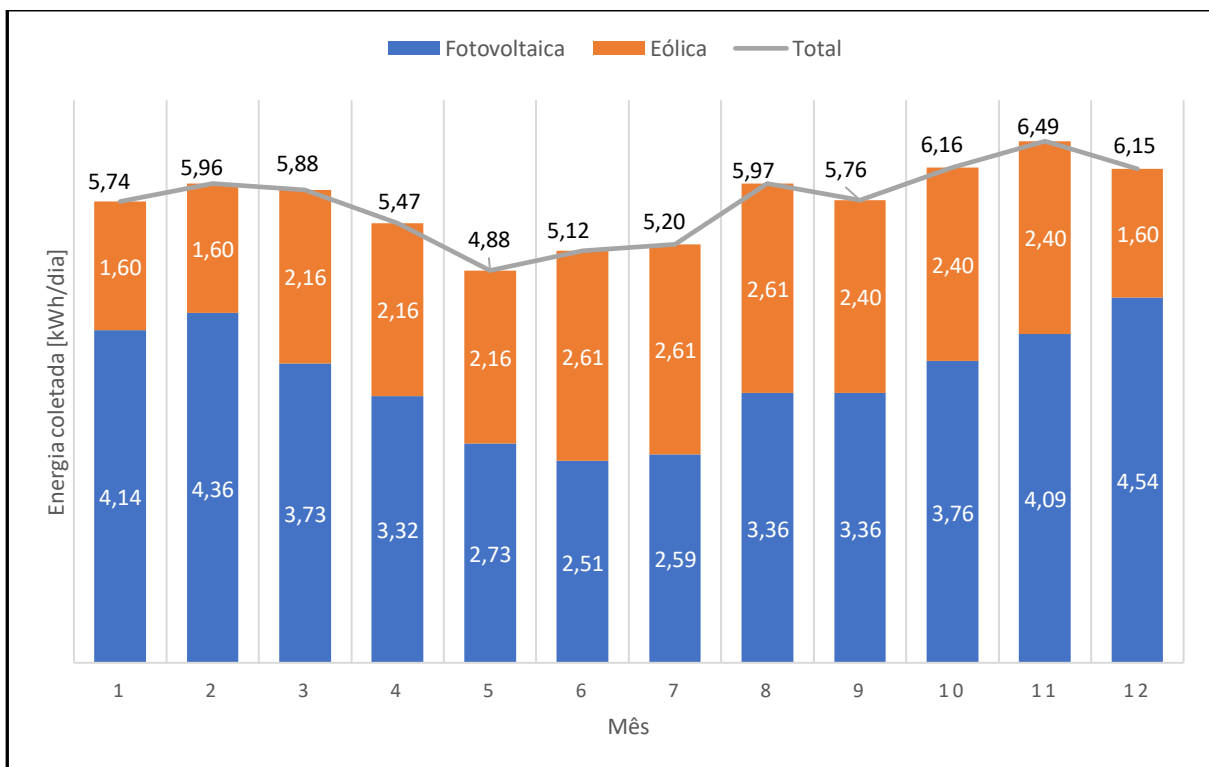


Figura 31 – Gráfico da energia coletada por desassoreador com 3 painéis e 1 turbina ao longo do ano

Aplicando o mesmo cálculo de coleta de energia total para as inclinações de painel apontadas na Tabela 28, obtém-se o comparativo de montagens possíveis apresentado na Tabela 30. Foi acrescentada a linha com os valores máximos encontrados a cada mês, para simular uma instalação em que o ângulo dos painéis é ajustado a cada mês usando uma das inclinações prescritas. Os valores são representados de forma gráfica na Figura 32.

Os resultados apontam que o arranjo com painéis horizontais tem captação média cerca de 3% inferior a outros arranjos de inclinação fixa, enquanto o ajuste mensal representaria um ganho de cerca de 6% em comparação com os painéis horizontais. No caso de utilizar painéis inclinados no convés, isso adicionaria o cuidado em manter a balsa virada na direção correta segundo os pontos cardiais. Já o ajuste periódico da inclinação exigiria o treinamento do operador na rotina de correção das placas.

Cabe estudar para cada local de instalação qual a solução mais apropriada considerando os custos e os ganhos envolvidos. Um desassoreador com uma bomba de 1cv e 100 metros de mangueira de diâmetro 2" removendo areia de massa específica 2650 kg/m³ a 25 metros abaixo da superfície consome uma potência estimada em 0,92kW. Assumindo que as conversões dos coletores para as baterias e das baterias para a bomba tenha uma eficiência da ordem de 85%, um regime de 6 horas de operação por dia exige $(0,88 \text{ kW}) * (6 \text{ h/dia}) / (0,85) = 6,21 \text{ kWh}$ coletados por dia. O banco de baterias estimado conta com 10 baterias tipo solar com 12V e 240Ah que devem ser usadas com profundidade de descarga 20%, o que totaliza uma carga útil de $12 * 240 * 10 * 0,2 = 5,76 \text{ kWh}$.

Tabela 30 – Energia total coletada pelo desassoreador com 3 painéis fotovoltaicos em diferentes inclinações e 1 turbina eólica

	Energia coletada [kWh/dia]												Média
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	
Horiz.	5,74	5,96	5,88	5,47	4,88	5,12	5,20	5,97	5,76	6,16	6,49	6,15	5,73
24°N	5,34	5,75	5,98	5,92	5,53	5,90	5,91	6,60	5,97	6,06	6,15	5,63	5,9 (+2,9%)
21°N	5,41	5,80	6,00	5,89	5,47	5,82	5,84	6,55	5,97	6,10	6,21	5,72	5,9 (+2,9%)
34°N	5,06	5,52	5,89	5,96	5,68	6,08	6,08	6,71	5,93	5,90	5,88	5,30	5,83 (+1,8%)
Máx	5,74	5,96	6,00	5,96	5,68	6,08	6,08	6,71	5,97	6,16	6,49	6,15	6,08 (+6,1%)

O regime de 6 horas de bomba ligada por dia são uma aproximação supondo turnos de trabalho de 8 horas em que 25% do tempo seria gasto deslocando a balsa e fazendo ajustes, mas isso pode variar muito conforme mencionado no item 0. Se o operador tiver folga aos fins de semana, os dois dias com a bomba parada dão um mínimo estimado de 9,76kWh, mais que suficiente para completar o banco de baterias; ao longo da semana o sistema opera em déficit energético, e se recarrega quando está parado.

Nas épocas em que a captação é maior, pode-se ajustar o sistema para manter operando por mais horas por dia, ou trabalhar mais perto da margem com uma mangueira menor para aumentar a potência, a vazão e possivelmente a concentração de sólidos na suspensão aspirada.

O uso de mangueiras de comprimentos distintos, ou de trechos de mangueira com acoplamentos para compor um comprimento ajustável, deve ser estudado em etapas futuras de detalhamento como uma maneira de otimizar a operação conforme se varre diferentes partes do reservatório.

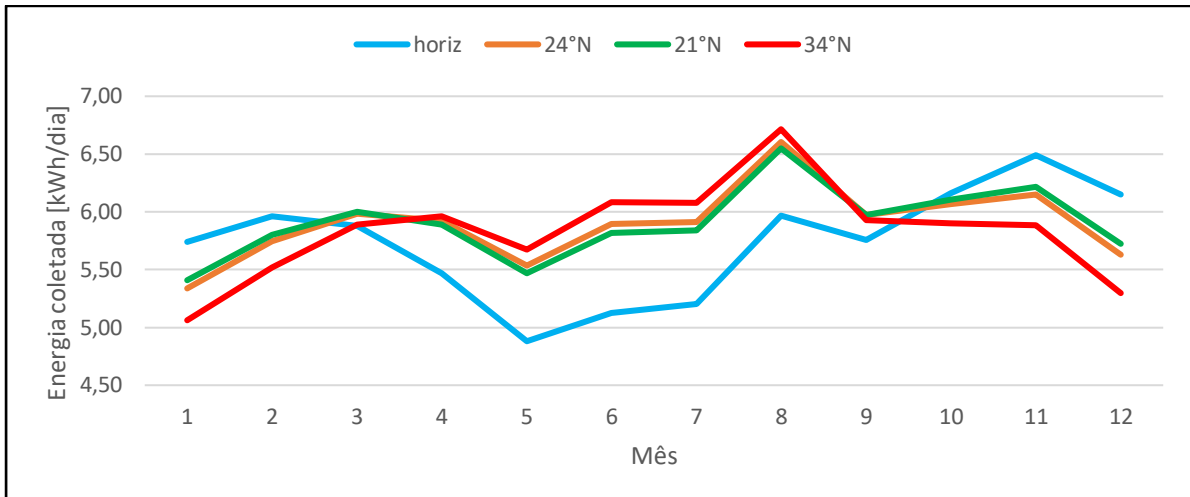


Figura 32 – Gráfico da energia coletada por desassoreador com 3 painéis com diferentes inclinações e 1 turbina ao longo do ano