

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO – USP
INSTITUTO DE ENERGIA E AMBIENTE – IEE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENERGIA – PPGE

LÚCIO CARLOS RESENDE

**Desenvolvimento de um modelo empírico de estimativa do volume
diário de água bombeado por sistemas fotovoltaicos de
bombeamento**

São Paulo
2023

LÚCIO CARLOS RESENDE

**Desenvolvimento de um modelo empírico de estimativa
do volume diário de água bombeado por sistemas
fotovoltaicos de bombeamento**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Energia do Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo para a obtenção do título de Mestre em Ciências.

Orientador: Prof. Dr. Roberto Zilles
Coorientador: Prof. Dr. Alaan Ubaiara Brito

Versão Corrigida

São Paulo
2023

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTES TRABALHOS, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

FICHA CATALOGRÁFICA

Resende, Lúcio Carlos.

Desenvolvimento de um método empírico de estimativa do volume diário de água bombeado por Sistemas Fotovoltaicos de Bombeamento. / Lúcio Carlos Resende; orientador: Roberto Zilles. – São Paulo, 2023. 137 f.: il; 30 cm.

Dissertação (Mestrado em Ciências) – Programa de Pós-Graduação em Energia – Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo.

1. Sistemas fotovoltaicos. 2. Bombeamento fotovoltaico. I. Título.

Elaborado por Maria Penha da Silva Oliveira CRB-8/6961

Nome: RESENDE, Lúcio Carlos

Título: Desenvolvimento de um modelo empírico de estimativa do volume diário de água bombeado por Sistemas Fotovoltaicos de Bombeamento.

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Energia do Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo para a obtenção do título de Mestre em Ciências.

Trabalho aprovado em: 06/10/2023

Banca Examinadora

Prof. Dr. Ing. João Tavares Pinho

Julgamento: Aprovado

Instituição: Universidade de São Paulo (USP)

Assinatura: _____

Prof. Dr. Wilson Negrão Macêdo

Julgamento: Aprovado

Instituição: Universidade Federal do Pará (UFPA)

Assinatura: _____

Prof. Dr. Geraldo Neves de Albuquerque Maranhão

Julgamento: Aprovado

Instituição: Universidade Federal do Amapá (UNIFAP)

Assinatura: _____

AGRADECIMENTOS

Sou grato a Deus, por me guiar durante toda a minha trajetória e por me conceder essa rica oportunidade de estudar em uma instituição tão renomada como a Universidade de São Paulo.

Agradeço aos meus pais, Divino Carlos e Maria Helena de Paula Resende, pelo cuidado, carinho, incentivo e suporte aos meus estudos e ao meu desenvolvimento profissional e pessoal durante todos esses anos.

Grato à minha namorada Karen, por todo amor, cuidado e parceria que temos um para com o outro.

Agradeço à minha avó Marieta, às minhas tias Ana Maria, Lúcia, Lacy e Dalva, ao meu primo Márcio Rosa, às minhas primas Lara Cristina, Layla Paola e Larissa Cristiane, aos meus tios José Antônio, Rogério e Sandoval e a todos os demais membros da família, por sempre confiarem em meu potencial.

Agradeço aos meus amigos de Uberlândia, que sempre torceram por mim e estiveram comigo em momentos decisivos da minha vida: Filipe Ferreira, Thiago Augusto, João Batista, Guilherme Costa, Michael Douglas, Ana Gabriela, Camila Pelegrini, Elaine Faria, Joyce Pereira, Patrícia Ferreira, Abishai Coge, Rayde Arantes, Gabriela Oliveira, Guilherme de Freitas, Enis Queiroz, Eliesmar Costa, Joesley Tolentino, Fernanda Gonçalves, Caio Vitor, Juliano Silva, Arteniária Soares, Ederlon Rodrigues, entre outros.

Sou grato à Universidade de São Paulo (USP), ao Instituto de Energia e Ambiente (IEE), ao Programa de Pós-Graduação em Energia (PPGE) e ao Laboratório de Sistemas Fotovoltaicos (LSF), pelo apoio institucional e por toda infraestrutura disponibilizada para realização do presente estudo.

Agradeço ao Professor Doutor Roberto Zilles, por todo suporte e confiança direcionados a mim, desde quando manifestei interesse em realizar meu mestrado no PPGE sob sua orientação até a defesa do presente trabalho.

Agradeço ao Professor Doutor Alaan Ubaiara Brito, pela disponibilização de seu laboratório na Universidade Federal do Amapá (UNIFAP) para realização de parte dos ensaios experimentais deste trabalho, por todas as experiências compartilhadas durante a minha viagem ao Amapá e também por exercer seu papel como coorientador de maneira exemplar.

Sou grato também ao Mestre Teddy Arturo Flores Melendez e à Doutora Maria Cristina Fedrizzi, pela amizade e pelo compartilhamento de todos os conhecimentos teóricos e operacionais essenciais à realização deste trabalho.

Agradecimentos são estendidos aos demais membros do Laboratório de Sistemas Fotovoltaicos (LSF), pelo contínuo apoio, suporte e boa convivência.

Agradeço também aos meus amigos, Arthur Dias, Pedro Torres, Paulo Henrique Lisboa, Giacomo Pasolini, Horacio Samudio, Andrea Damico e Marcos Soares por me acompanharem durante toda a minha estadia em São Paulo e proporcionarem momentos de alegria e descontração.

Agradeço à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo financiamento de minha bolsa de estudos sob o processo nº 88887.606555/2021-00.

Por fim, sou grato ao auxílio financeiro da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), por meio do Processo 2019/23791-0, e da Fundação de Amparo à Pesquisa do Amapá, FAPEAP, por meio Termo de Outorga de Auxílio Financeiro 002/2020, ao projeto de pesquisa no qual o presente trabalho está inserido.

RESUMO

RESENDE, Lúcio Carlos. **Desenvolvimento de um método empírico de estimativa do volume diário de água bombeado por Sistemas Fotovoltaicos de Bombeamento**. 2023. 137 p. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Programa de Pós-Graduação em Energia da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2023.

O acesso à água é fundamental para a sobrevivência humana e para o desenvolvimento econômico das atividades campestres. Uma das alternativas para garantir tal acesso é a utilização de Sistemas Fotovoltaicos de Bombeamento (SFB), os quais devem estar adequadamente dimensionados para atender as demandas hídricas dos seus usuários. Um dos desafios enfrentados pelos projetistas no dimensionamento de SFB é a discrepância entre os dados provenientes dos catálogos dos fabricantes e aqueles medidos nas condições de campo. Neste sentido, o presente trabalho visou ao desenvolvimento de um modelo empírico geral para estimativa do volume bombeado por SFB compostos por módulos fotovoltaicos de silício cristalino, bombas centrífugas multiestágios submersas, motores de indução trifásicos e conversores de frequência. Para tal, foram realizados ensaios a sol real com oito configurações de SFB, com motobombas de 0,5 cv, 1 cv, 1,5 cv e 2 cv. Por meio de uma bancada laboratorial capaz de estabilizar a altura manométrica, foram monitorados e coletados dados de irradiância, vazão e altura manométrica, que permitiram, respectivamente, a obtenção da irradiação diária no plano do gerador fotovoltaico, o volume bombeado diário e a altura manométrica média diária. Os dados de potência nominal real dos geradores fotovoltaicos foram obtidos por meio de medições feitas por traçadores de curva I-V e P-V. A partir desses dados mensurados, foram desenvolvidos três modelos de regressão linear simples: o primeiro contendo apenas amostras com proporção de irradiação difusa (PD) $\leq 25\%$; o segundo contendo dias com PD $\leq 30\%$ e o último, com amostras contendo PD $\leq 40\%$. Todos os modelos foram submetidos a testes de significância estatística de seus coeficientes, testes de hipótese para verificação de cumprimento de premissas do Método de Mínimos Quadrados Ordinários (MMQO) e a métricas de avaliação da qualidade do ajuste, como o Coeficiente de Determinação (R^2) e Erro Médio Percentual Absoluto (MAPE). Por fim, foi selecionado o melhor modelo empírico e indicadas as condições de contorno para as quais este modelo é válido.

Palavras-chaves: Dimensionamento. Regressão linear simples. Bombeamento Fotovoltaico.

ABSTRACT

RESENDE, Lúcio Carlos. **Development of an empirical method for estimating the daily volume of water pumped by Photovoltaic Pumping Systems**. 2023. 137 p. Thesis (Master in Sciences) – Graduate Program in Energy of the University of São Paulo, São Paulo, 2023.

Access to water is crucial for human survival and the economic development of rural activities. One alternative to ensure such access is the utilization of Photovoltaic Pumping Systems (PVPS), which must be adequately sized to meet the water demands of their users. One of the challenges faced by designers in the sizing of PVPS is the discrepancy between data provided by manufacturers' catalogs and those measured under field conditions. In this context, the present study aimed to develop a general empirical model for estimating the volume pumped by PVPS composed of crystalline silicon photovoltaic modules, submersible multi-stage centrifugal pumps, three-phase induction motors, and frequency converters. For this purpose, real-time tests were conducted with eight configurations of PVPS, with motor pumps of 0.5 hp, 1 hp, 1.5 hp, and 2 hp. Through a laboratory setup capable of stabilizing the manometric head, data on irradiance, flow rate, and manometric head were monitored and collected, allowing the determination of daily irradiation on the photovoltaic generator plane, daily pumped volume, and daily average manometric head, respectively. The actual nominal power data of the photovoltaic generators were obtained through measurements performed by I-V and P-V curve tracers. Based on these measured data, three simple linear regression models were developed: the first containing only samples with diffuse irradiation proportion (DI) $\leq 25\%$; the second containing days with DI $\leq 30\%$; and the last one with samples containing DI $\leq 40\%$. All models underwent statistical significance tests of their coefficients, hypothesis tests to verify the fulfillment of Ordinary Least Squares Method (OLSM) assumptions, and evaluation metrics for fit quality, such as the Coefficient of Determination (R^2) and Mean Absolute Percentage Error (MAPE). Finally, the best empirical model was selected, and the boundary conditions for which it is valid were indicated.

Key-words: Sizing. Simple linear regression. Photovoltaic pumping.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1 – Irradiação global média diária anual no plano inclinado à latitude local.	22
Figura 2.1 – Diferentes sistemas de bombeamento solar acionados por fonte primária solar.	28
Figura 2.2 – Componentes de um sistema de bombeamento termosolar.	29
Figura 2.3 – Desenho esquemático dos componentes de Sistemas Fotovoltaicos de Bombeamento.	31
Figura 2.4 – Ilustração dos conceitos de célula, módulo e gerador fotovoltaico.	32
Figura 2.5 – Curvas características de módulo fotovoltaico de silício cristalino de 72 células.	33
Figura 2.6 – Configurações de posicionamento de Sistemas Fotovoltaicos de Bombeamento.	36
Figura 2.7 – Curvas características de bomba centrífuga nacional: (a) Vazão em função da Altura Manométrica; (b) Vazão em função da Potência consumida pela bomba; (c) Vazão em função da Eficiência da bomba.	38
Figura 2.8 – Classificação das bombas centrífugas quanto a trajetória do fluxo.	39
Figura 2.9 – Classificação das bombas centrífugas quanto ao número de estágios.	40
Figura 2.10–Tipologias de bombas de deslocamento positivo alternativas.	40
Figura 2.11–Tipologias de bombas de deslocamento positivo rotativas: (a) engrenagem; (b) lóbulos; (c) parafuso.	41
Figura 2.12–Vista interna de motor de corrente contínua de ímã permanente com escovas.	42
Figura 2.13–Vista interna de motor de corrente contínua de ímã permanente sem escovas.	43
Figura 2.14–Representação de motor elétrico de corrente alternada do tipo gaiola de esquilo.	44
Figura 2.15–Exemplos de conversores de frequência de diferentes potências.	46
Figura 2.16–Esquema das componentes da altura manométrica total para captação subterrânea.	50
Figura 2.17–Esquema das componentes da altura manométrica total para captação superficial.	51
Figura 2.18–Tela principal do <i>software PVSyst</i> versão 7.2.	55
Figura 3.1 – Vista aérea da área externa do Laboratório de Sistemas Fotovoltaicos (LSF).	60
Figura 3.2 – Vista aérea do terraço do bloco da Coordenação do Curso de Engenharia Elétrica da UNIFAP.	60
Figura 3.3 – Gerador fotovoltaico da <i>Isofotón</i> utilizado nos ensaios de motobombas de 1,5 cv e 2 cv na USP.	62
Figura 3.4 – Gerador fotovoltaico com módulos fotovoltaicos da <i>Yingli Solar</i> utilizado nos ensaios de motobombas de 0,5 cv na UNIFAP.	63
Figura 3.5 – Gerador fotovoltaico da <i>Komaes</i> utilizado nos ensaios de motobombas de 1 cv na UNIFAP.	63

Figura 3.6 – Motobombas centrífugas submersíveis empregadas no estudo: (a) motobomba de 0,5 cv e 1 cv – UNIFAP; (b) motobombas de 1,5 cv e 2 cv – USP; (c) motobomba padrão de teste – USP/UNIFAP.	65
Figura 3.7 – Conversor de frequência CFW500- <i>Solar Drive</i> : (a) USP; (b) UNIFAP.	70
Figura 3.8 – Conversor de frequência CFW500- <i>Vector Inverter</i> : (a) USP; (b) UNIFAP.	70
Figura 3.9 – Medidores de curvas características de geradores fotovoltaicos: (a) PVPM 1000 C 40; (b) Solar IVw.	73
Figura 3.10–Traçador de curva I-V modelo PVPM 1000C 40, juntamente com os três tipos de células de referência ISET e a chave seccionadora PVPM-LTSX1000.	73
Figura 3.11–Exemplo de relatório de curva I-V realizado pelo <i>software</i> PVPM.disp.	74
Figura 3.12–Exemplo de relatório de curva I-V obtido pelo <i>software</i> da <i>HT Instruments</i>	75
Figura 3.13–Vistas das bancadas de ensaio de bombeamento: (a) LSF – IEE/USP; (b) UNIFAP.	76
Figura 3.14–Fonte de tensão estabilizada 500 Vcc/10 A da <i>Tectrol</i>	78
Figura 3.15–Vista frontal do simulador de arranjo fotovoltaico E4362A da <i>Agilent</i>	78
Figura 3.16–Vista traseira dos módulos que compõem o simulador E4362A da <i>Agilent</i>	79
Figura 3.17–Estação solarimétrica do LSF-IEE/USP.	82
Figura 3.18– <i>Datalogger</i> CR10X da <i>Campbell Scientific</i> com bateria de alimentação.	85
Figura 3.19– <i>Datalogger</i> HP34970A da <i>Agilent</i> utilizado em ambas universidades.	85
Figura 4.1 – Curva da Vazão ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$) em função da Altura Manométrica (m.c.a.): (a) Schneider 0,5 cv; (b) Leão 0,5 cv.	96
Figura 4.2 – Curva da Vazão ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$) em função da Altura Manométrica (m.c.a.): (a) Schneider 1 cv; (b) Leão 1 cv.	97
Figura 4.3 – Curva da Vazão ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$) em função da Altura Manométrica (m.c.a.): (a) Schneider 1,5 cv; (b) Leão 1,5 cv.	98
Figura 4.4 – Curva da Vazão ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$) em função da Altura Manométrica (m.c.a.): (a) Schneider 2 cv; (b) Leão 2 cv.	99
Figura 4.5 – Curva da Eficiência em função da Altura Manométrica (m.c.a.): (a) Schneider 0,5 cv; (b) Leão 0,5 cv.	101
Figura 4.6 – Curva da Eficiência em função da Altura Manométrica (m.c.a.): (a) Schneider 1 cv; (b) Leão 1 cv.	102
Figura 4.7 – Curva da Eficiência em função da Altura Manométrica (m.c.a.): (a) Schneider 1,5 cv; (b) Leão 1,5 cv.	103
Figura 4.8 – Curva da Eficiência em função da Altura Manométrica (m.c.a.): (a) Schneider 2 cv; (b) Leão 2 cv.	104
Figura 4.9 – Curva da Vazão ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$) em função da Potência em Corrente Contínua (W) para diferentes Alturas Manométricas (m.c.a.): (a) Schneider 0,5 cv; (b) Leão 0,5 cv.	108

Figura 4.10–Curva da Vazão ($\text{m}^3.\text{h}^{-1}$) em função da Potência em Corrente Contínua (W) para diferentes Alturas Manométricas (m.c.a.): (a) Schneider 1 cv; (b) Leão 1 cv.	109
Figura 4.11–Curva da Vazão ($\text{m}^3.\text{h}^{-1}$) em função da Potência em Corrente Contínua (W) para diferentes Alturas Manométricas (m.c.a.): (a) Schneider 1,5 cv; (b) Leão 1,5 cv.	110
Figura 4.12–Curva da Vazão ($\text{m}^3.\text{h}^{-1}$) em função da Potência em Corrente Contínua (W) para diferentes Alturas Manométricas (m.c.a.): (a) Schneider 2 cv; (b) Leão 2 cv.	111
Figura 4.13–Curva da Vazão ($\text{m}^3.\text{h}^{-1}$) em função da Altura Manométrica (m.c.a.) para a motobomba padrão de teste obtidas nas bancadas da USP e da UNIFAP. . .	113
Figura 4.14–Modelo empírico de estimativa do volume bombeado desenvolvido com observações com $\text{PD} \leq 25\%$ (com dados de treino).	115
Figura 4.15–Modelo empírico de estimativa do volume bombeado desenvolvido com observações com $\text{PD} \leq 30\%$ (com dados de treino).	115
Figura 4.16–Modelo empírico de estimativa do volume bombeado desenvolvido com observações com $\text{PD} \leq 40\%$ (com dados de treino).	116
Figura 4.17–Modelo empírico de estimativa do volume bombeado desenvolvido com observações com $\text{PD} \leq 25\%$ (com dados de teste).	118
Figura 4.18–Modelo empírico de estimativa do volume bombeado desenvolvido com observações com $\text{PD} \leq 30\%$ (com dados de teste).	119
Figura 4.19–Modelo empírico de estimativa do volume bombeado desenvolvido com observações com $\text{PD} \leq 40\%$ (com dados de teste).	119
Figura 4.20–Curva da Vazão ($\text{m}^3.\text{h}^{-1}$) em função da Irradiância ($\text{W}.\text{m}^{-2}$): (a) Schneider 0,5 cv – 22/06/2021 ; (b) Leão 0,5 cv – 20/08/2021.	121
Figura 4.21–Curva da Vazão ($\text{m}^3.\text{h}^{-1}$) em função da Irradiância ($\text{W}.\text{m}^{-2}$): (a) Schneider 1 cv – 13/10/2021; (b) Leão 1 cv – 22/01/2022.	122
Figura 4.22–Curva da Vazão ($\text{m}^3.\text{h}^{-1}$) em função da Irradiância ($\text{W}.\text{m}^{-2}$): (a) Schneider 1,5 cv – 14/06/2021 ; (b) Leão 1,5 cv – 05/05/2021.	122
Figura 4.23–Curva da Vazão ($\text{m}^3.\text{h}^{-1}$) em função da Irradiância ($\text{W}.\text{m}^{-2}$): (a) Schneider 2 cv – 10/07/2021; (b) Leão 2 cv – 06/08/2021.	123
Figura A.1 – Motobomba selecionada para a situação-exemplo.	136

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Estimativa de consumo médio de água para diferentes usos finais em ambiente rural.	49
Tabela 3.1 – Características dos sistemas fotovoltaicos de bombeamento avaliados. . . .	61
Tabela 3.2 – Características técnicas dos módulos fotovoltaicos utilizados nos experimentos.	64
Tabela 3.3 – Características técnicas das motobombas utilizadas nos experimentos. . . .	65
Tabela 3.4 – Motobomba Schneider, modelo SUB15-05NY4E4, 4 estágios, de 0,5 cv. . . .	66
Tabela 3.5 – Motobomba Schneider, modelo SUB25-10NY4E6, 6 estágios, de 1 cv. . . .	66
Tabela 3.6 – Motobomba Schneider, modelo SUB40-15S4E6, 6 estágios, de 1,5 cv. . . .	67
Tabela 3.7 – Motobomba Schneider, modelo SUB40-20S4E8, 8 estágios, de 2 cv.	67
Tabela 3.8 – Motobomba Leão, modelo 4R4PA-06 230, 6 estágios, de 0,5 cv.	67
Tabela 3.9 – Motobomba Leão, modelo 4R6PB-06 230, 6 estágios, de 1 cv.	68
Tabela 3.10–Motobomba Leão, modelo 4R6PB-07 370, 7 estágios, de 1,5 cv.	68
Tabela 3.11–Motobomba Leão, modelo 4R6PB-09 370, 9 estágios, de 2 cv.	68
Tabela 3.12–Motobomba Leão, modelo 4R4PA-05 230, 5 estágios, de 0,5 cv.	69
Tabela 3.13–Características técnicas dos conversores de frequência utilizados.	71
Tabela 3.14–Associação entre motobombas sob teste e motobombas utilizadas para controle da pressão.	77
Tabela 3.15–Alturas manométricas de realização dos testes de caracterização de motobombas com fonte c.c. para as diferentes configurações avaliadas.	80
Tabela 3.16–Configuração de parâmetros do CFW500 <i>Solar Drive</i> para teste com fonte c.c. .	80
Tabela 3.17–Alturas manométricas de realização dos testes de caracterização de motobombas a sol real para as diferentes configurações avaliadas.	81
Tabela 3.18–Configuração de parâmetros do CFW500 <i>Solar Drive</i> para testes a sol real. .	82
Tabela 3.19–Características da instrumentação da bancada de ensaio de bombeamento e da estação solarimétrica do IEE/USP.	83
Tabela 3.20–Características da instrumentação da bancada de ensaio de bombeamento da UNIFAP.	84
Tabela 3.21–Descrição dos ensaios a sol real realizados para as diferentes configurações de Sistema Fotovoltaico de Bombeamento.	88
Tabela 4.1 – Resultado da caracterização dos módulos <i>Isofotón</i> , ISF – 60/12.	92
Tabela 4.2 – Resultado da caracterização dos módulos <i>Yingli Solar</i> , YL55P-17b.	93
Tabela 4.3 – Resultado da caracterização dos módulos <i>Komaes</i> , KM-P-85.	94
Tabela 4.4 – Comparação entre as alturas de maior eficiência (calculada a partir de catálogo, medida com fonte c.c. e utilizada nos ensaios a sol real).	106
Tabela 4.5 – Comparação das eficiências medidas para altura manométrica de maior eficiência e para altura manométrica empregada nos ensaios a sol.	107

Tabela 4.6 – Descrição dos ensaios a sol real realizados para as diferentes configurações de Sistema Fotovoltaico de Bombeamento.	114
Tabela 4.7 – Resultados relativos aos testes de hipóteses de requisitos do MMQO aplicados ao modelo empírico desenvolvido para dados com $PD \leq 25\%$	116
Tabela 4.8 – Resultados relativos aos testes de hipóteses de requisitos do MMQO aplicados ao modelo empírico desenvolvido para dados com $PD \leq 30\%$	117
Tabela 4.9 – Resultados relativos aos testes de hipóteses de requisitos do MMQO aplicados ao modelo empírico desenvolvido para dados com $PD \leq 40\%$	117

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA	Agência Nacional das Águas
ANOVA	Análise de Variância
AP	Amapá
a-Si	Silício Amorfo
c.a.	Corrente Alternada
c.c.	Corrente Contínua
CC	Constante de calibração
CdTe	Telureto de Cádmio
C_H	Constante hidráulica
CIGS	Cobre-Índio-Gálio-Selênio
$\cos \phi$	Fator de Potência
CRESESB	Centro de Referência para as Energias Solar e Eólica Sérgio de S. Brito
CSV	Valores separados por vírgulas (do inglês <i>Comma-Separated Values</i>)
cv	Cavalos – medida de potência
DPC	Dispositivo para Programação de Controladores
E_{EL}	Energia elétrica demandada pela motobomba
$E_{ff} - H_{man}$	Eficiência em função da Altura Manométrica
E_g	Banda proibida
EMPA	Erro Máximo Percentual Absoluto
FD	Fator de Dimensionamento
FV	Fotovoltaico
g	Aceleração devido à gravidade
G	Ganho
G_{REF}	Irradiância nas Condições Padrão de Teste

G_T	Irradiação global diária no plano do gerador fotovoltaico
H_{dwl}	Altura dinâmica
H_{elev}	Altura vertical
$H_{estática}$	Altura estática
H_f	Perdas por fricção
H_{man}	Altura manométrica total
HOMER	<i>Hybrid Optimization of Multiple Electric Renewables</i>
H_{res}	Perdas residuais
HSP	Horas de Sol Pleno
$H_{sucção}$	Altura de sucção
I	Corrente elétrica
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ID	Identificador
I_{mp}	Corrente de máxima potência
I_{sc}	Corrente de curto-circuito
IEE	Instituto de Energia e Ambiente
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
I-V	Corrente em função da Tensão
LDR	Resistor dependente de luz (do inglês <i>Light Dependent Resistor</i>)
LOLP	Probabilidade de Perda de Carga (do inglês <i>Loss of Load Probability</i>)
LSF	Laboratório de Sistemas Fotovoltaicos
MAPE	Erro Médio Percentual Absoluto (do inglês <i>Mean Absolute Percentage Error</i>)
m.c.a.	Metros de coluna de água
MMQO	Método dos Mínimos Quadrados Ordinários
mono-Si	Silício Monocristalino

MPPT	Seguimento do Ponto de Máxima Potência (do inglês <i>Maximum Power Point Tracking</i>)
multi-Si	Silício Multicristalino
NREL	<i>National Renewable Energy Laboratory</i>
PAR	Radiação Fotossinteticamente Ativa (do inglês <i>Photosynthetically Active Radiation</i>)
P_{ca}	Potência elétrica do motor de corrente alternada
PD	Proporção de Irradiação Difusa
P_{EL}	Potência elétrica no eixo do conjunto motobomba
P_{GFV}	Potência nominal do gerador fotovoltaico
P_H	Potência hidráulica
PIC	Controlador de interface periférico (do inglês <i>Peripheral Interface Controller</i>)
PID	Proporcional Integral Derivativo
P_{MB}	Potência do conjunto motobomba
P_{mp}	Ponto de máxima potência
p.p.	Pontos percentuais
Pt	Termômetros de resistência de platina (do inglês <i>Platinum resistance thermometers</i>)
P-V	Potência em função da Tensão
PVE	<i>Photovoltaik engineering</i>
PVGIS	<i>Photovoltaic Geographical Information System</i>
PWM	Modulação por largura de pulso (do inglês <i>Pulse Width Modulation</i>)
Q	Vazão de projeto
Q_E	Vazão nominal escolhida
$Q-H_{man}$	Vazão em função da Altura Manométrica
$Q-I_g$	Vazão em função da Irradiância no plano do gerador fotovoltaico

Q-P	Vazão em função da Potência em Corrente Contínua
RC	Resistor-Capacitor
RETScreen	<i>Renewable Energy and Energy Efficiency Technology Screen</i>
SFB	Sistemas Fotovoltaicos de Bombeamento
SFCR	Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede
SFI	Sistemas Fotovoltaicos Isolados
SHP	<i>Shapefile</i>
SIG	Sistema de Informação Geográfica
SQR	Soma dos Quadrados dos Resíduos
SQT	Soma dos Quadrados Totais
STB	Sistemas Termossolares de Bombeamento
STC	Condições de Teste Padrão (do inglês <i>Standard Test Conditions</i>)
SNS	Secretaria Nacional de Saneamento
SP	São Paulo
T	Tempo de operação da motobomba
UNIFAP	Universidade Federal do Amapá
USP	Universidade de São Paulo
V	Tensão ou Volts
V_B	Volume bombeado ao longo de um ciclo
V_{ca}	Tensão em corrente alternada
V_{cc}	Tensão em corrente contínua
V_D	Volume demandado ao longo de um ciclo
V_{mp}	Tensão de máxima potência
V_{oc}	Tensão de circuito aberto
W_p	Watts-pico
η_{CP}	Eficiência do dispositivo de condicionamento de potência

η_{MB} Eficiência do conjunto motobomba

ρ Densidade da água

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	21
1.1	Problema a ser estudado	23
1.2	Objetivo	23
1.3	Justificativa	24
1.4	Estrutura do trabalho	25
2	REVISÃO DE LITERATURA	27
2.1	Tecnologias de bombeamento de água	27
2.1.1	Sistemas de bombeamento manuais	27
2.1.2	Sistemas de bombeamento acionados por motores a combustão interna	27
2.1.3	Sistemas de bombeamento acionados pelos ventos	27
2.1.4	Sistemas de bombeamento elétrico acionados pela rede elétrica convencional	28
2.1.5	Sistemas de bombeamento acionados por energia solar	28
2.1.5.1	Sistemas Termossolares de Bombeamento	29
2.1.5.2	Sistemas Termoiônicos de Bombeamento	29
2.1.5.3	Sistemas Termoelétricos de Bombeamento	30
2.1.5.4	Sistemas Fotovoltaicos de Bombeamento (SFB)	30
2.2	Sistemas fotovoltaicos de Bombeamento (SFB)	31
2.2.1	Gerador Fotovoltaico	32
2.2.1.1	Fatores associados ao gerador fotovoltaico que influenciam o desempenho do sistema de bombeamento	34
2.2.2	Conjunto Motobomba	36
2.2.2.1	Bombas	37
2.2.2.1.1	Bombas dinâmicas	39
2.2.2.1.2	Bombas de deslocamento positivo	40
2.2.2.2	Motores elétricos	41
2.2.2.2.1	Motores elétricos de corrente contínua	42
2.2.2.2.2	Motores elétricos de corrente alternada	43
2.2.3	Dispositivos de condicionamento de potência	44
2.2.3.1	<i>Boosters</i> lineares de corrente	44
2.2.3.2	Conversores c.c.-c.c.	45
2.2.3.3	Inversores c.c. – c.a.	45
2.2.3.4	Conversores de frequência	45
2.2.4	Sistemas de armazenamento	46

2.3	Configurações de sistemas fotovoltaicos de bombeamento com conversores de frequência	47
2.3.1	Configuração de Brito (2006)	47
2.3.2	Configuração de Maranhão (2015)	47
2.3.3	Configuração de Santos <i>et al.</i> (2020)	48
2.4	Dimensionamento de sistemas fotovoltaicos de bombeamento	48
2.4.1	Variáveis de Projeto	48
2.4.1.1	Demanda diária de água ($m^3 \cdot dia^{-1}$)	48
2.4.1.2	Altura manométrica total	49
2.4.1.3	Recurso solar	51
2.4.2	Equações básicas para Dimensionamento de Sistemas Fotovoltaicos de Bombeamento	52
2.4.3	<i>Softwares</i> para Dimensionamento de Sistemas Fotovoltaicos de Bombeamento	54
2.4.3.1	<i>PVSyst</i>	55
3	MATERIAIS E MÉTODOS	59
3.1	Área de estudo	59
3.2	Configurações de sistemas fotovoltaicos de Bombeamento estudados	60
3.3	Caracterização dos componentes dos sistemas fotovoltaicos de Bombeamento	62
3.3.1	Gerador fotovoltaico	62
3.3.2	Conjunto Motobomba	64
3.3.3	Conversores de frequência	69
3.4	Descrição geral das etapas experimentais	71
3.5	Procedimentos metodológicos para realização das etapas experimentais	72
3.5.1	Teste para obtenção de curvas características do gerador fotovoltaico	72
3.5.1.1	Método de operação do traçador de curvas PVPM 1000C 40	73
3.5.1.2	Método de operação do traçador de curvas Solar IVw	74
3.5.2	Teste para caracterização de motobombas	76
3.5.2.1	Procedimento para realização dos ensaios com a fonte de tensão estabilizada	77
3.5.2.2	Procedimento para realização dos ensaios a sol	81
3.6	Instrumentação das bancadas de ensaio	82
3.7	Procedimentos metodológicos para realização da coleta, compilação e análise de dados	85
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	92
4.1	Caracterização dos geradores fotovoltaicos	92

4.2	Caracterização das curvas características das motobombas	94
4.2.1	Comparação das curvas Vazão em função da Altura Manométrica medidas e de catálogo	95
4.2.2	Determinação da altura manométrica (m.c.a.) de maior eficiência das motobombas e validação da altura selecionada para os ensaios a sol real	100
4.2.3	Obtenção das curvas de Vazão em função da Potência c.c.	107
4.2.4	Comparação das curvas de Vazão em função da Altura Manométrica da motobomba padrão de teste obtidas em diferentes bancadas	112
4.3	Caracterização dos ensaios de motobombas a sol real	113
4.3.1	Desenvolvimento do Modelo Empírico de Estimativa do Volume Bombeado	114
4.3.1.1	Condições de contorno do modelo empírico selecionado	120
4.3.2	Validação do dimensionamento dos geradores fotovoltaicos a partir das curvas Vazão em função da Irradiância	121
5	CONCLUSÃO	125
	REFERÊNCIAS	127
	APÊNDICES	135
	APÊNDICE A – EXEMPLO DE DIMENSIONAMENTO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS DE BOMBEAMENTO UTILIZANDO O MODELO EMPÍRICO DESENVOLVIDO	136

1 INTRODUÇÃO

A água é um item essencial para a existência das sociedades humanas, apresentando múltiplos usos. Os recursos hídricos são utilizados para consumo humano, irrigação de culturas, criação de animais, geração de energia, bem como em processos industriais (GLEICK, 1996). O acesso à água de boa qualidade não apenas possibilita o atendimento às demandas hídricas de diferentes setores (agricultura, indústrias, comércio e residências), mas também permite que as populações dispendam maior tempo em atividades econômicas produtivas e frequentem instituições de ensino. Além disso, tal acessibilidade reduz o número de casos associados a doenças de veiculação hídrica, o que resulta em menores índices de mortalidade e na redução de dispêndios médico-hospitalares (HULTON, 2012). Dessa forma, garantir o acesso à água significa contribuir diretamente para que o ser humano tenha seus direitos atendidos.

De acordo com World Bank Group (2022), em 2018, o montante global de água captada foi de quase 4 trilhões de m³, sendo o setor agropecuário (associado ao ambiente rural) responsável por quase 72% deste valor. Apesar disso, em 2020, cerca de 622 milhões de pessoas que viviam em zonas rurais ao redor do mundo não tinham acesso nem a um serviço básico de abastecimento de água. Destas, quase 340 milhões estão na África Subsaariana, 132 milhões estão no Sul da Ásia e 105 milhões no Leste Asiático e no Pacífico. Para promover a melhoria nos índices no fornecimento de água nessas localidades, uma das alternativas é a implementação de projetos de bombeamento, os quais requerem o fornecimento de energia elétrica para operação. No entanto, em 2020, cerca de 590 milhões de moradores de zonas rurais em todo o planeta não tinham acesso à eletricidade, grande parte dos quais viviam nas mesmas regiões com acesso deficitário à água: África Subsaariana (476 milhões de pessoas), Sul da Ásia (76,5 milhões) e Leste Asiático e Pacífico (34,4 milhões).

A América Latina e Caribe foram responsáveis, em 2018, pela captação de 410 bilhões de m³ de água, sendo o setor agropecuário responsável por quase 77% do total. No entanto, em 2020, cerca de 12,6 milhões de habitantes da região que viviam em zonas rurais não tinham acesso a um serviço básico de abastecimento de água e 7,9 milhões não tinham acesso à eletricidade (WORLD BANK GROUP, 2022). No Brasil, em 2021, as atividades rurais (agricultura, pecuária e consumo humano) também eram responsáveis por parcela significativa da captação de água (42,3 bilhões de m³ ou 63% do total captado), o que demonstra a importância deste recurso para o desenvolvimento das atividades econômicas campestres (ANA, 2022). Apesar disso, em 2019, mais de 2,7 milhões de residências rurais no país (cerca de 29% do total) não tinham acesso aos serviços de abastecimento de água por rede de distribuição ou por poço ou nascente (com canalização interna ao domicílio), de acordo com dados da Secretaria Nacional de Saneamento (SNS, 2021). A falta de acesso adequado à água em meio rural ainda era mais agravada nas regiões Norte (578 mil residências ou 48,6% do total da região) e Nordeste (quase 2 milhões de domicílios ou 43,3% do total). Coincidentemente, essas duas regiões brasi-

leiras concentravam, em 2017, o maior número de estabelecimentos agropecuários sem acesso à energia elétrica: 159 mil situavam-se no Norte e 472 mil no Nordeste do país (IBGE, 2020).

De acordo com Fedrizzi (1997), os elevados custos associados à implementação de linhas de transmissão e distribuição até comunidades rurais isoladas e a instabilidade nos preços e incerteza no fornecimento de combustíveis derivados de petróleo (diesel, gasolina) fazem com que a opção solar fotovoltaica para o bombeamento de água seja considerada como uma fonte alternativa de energia para o bombeamento de água na zona rural. O Brasil apresenta grande potencial para implementação de projetos de bombeamento fotovoltaico, pois, de acordo com Pereira *et al.* (2017), a incidência de radiação solar em seu território é abundante, especialmente na porção que engloba o pantanal (Mato Grosso e Mato Grosso do Sul), Goiás, parte de São Paulo, Minas Gerais e Tocantins e o sertão nordestino. Nessas regiões (situadas dentro do contorno azul do mapa), a irradiação global média diária anual no plano inclinado a latitude local varia de 5,25 a 6,25 kWh.m⁻².dia⁻¹, como destacado na Figura 1.1.

Figura 1.1 – Irradiação global média diária anual no plano inclinado à latitude local.



Fonte: Pereira *et al.* (2017)

Um sistema de bombeamento fotovoltaico típico é composto por módulos fotovoltaicos, por motores e bombas (formando o conjunto motobomba), por mecanismos de condicionamento de potência (como inversores, seguidores de máxima potência, controladores) e por sistemas de armazenamento (como reservatórios de água). Os componentes de um Sistema Fotovoltaico de Bombeamento (SFB) podem ser combinados em diferentes configurações, dentre as quais está aquela formada por gerador fotovoltaico (FV) de silício cristalino, bomba centrífuga, motor de indução trifásico de corrente alternada e conversor de frequência, este último utilizado como dispositivo de condicionamento de potência. De acordo com Morales (2016), a aplicação desta configuração no contexto brasileiro é vantajosa em função de alguns aspectos. Primeiramente,

seu uso permite uma maior flexibilidade dos projetos para atendimento à demanda local, pois permite o emprego de bombas centrífugas convencionais com variadas características de potência, altura manométrica e vazão. Além disso, as bombas centrífugas, os motores de indução trifásicos e os conversores de frequência são equipamentos facilmente adquiridos no mercado brasileiro, dada a existência de uma grande rede de distribuidores. Adicionalmente, alguns fabricantes deste tipo de motobombas apresentam logística de reposição de peças, o que facilita a manutenção.

O dimensionamento dos Sistemas Fotovoltaicos de Bombeamento (SFB) corresponde à determinação do “tamanho” dos elementos do conjunto (gerador fotovoltaico, conjunto motobomba, condicionadores de potência e reservatórios), os quais devem garantir o atendimento à demanda hídrica requerida pelos usuários a um bom custo-benefício (FEDRIZZI, 1997). Para a realização dos cálculos dimensionais, diversos parâmetros de projeto devem ser adequadamente estimados, tais como a disponibilidade do recurso solar local, a altura manométrica de bombeio e o volume de água demandado ao longo do dia (MELENDEZ, 2009).

1.1 PROBLEMA A SER ESTUDADO

Brito, Fedrizzi e Zilles (2007) mencionam que há uma discrepância entre as informações constantes nos catálogos dos fabricantes dos equipamentos que compõem os sistemas fotovoltaicos de bombeamento e os resultados obtidos a sol real. Nesse sentido, em aplicações que demandem uma maior confiabilidade, é essencial a realização de ensaios de desempenho operacional do sistema em campo, a fim de fornecer uma adequada estimativa do volume diário bombeado por meio de uma configuração específica. No entanto, tais testes operacionais dependem de infraestrutura laboratorial para o adequado dimensionamento do sistema, a qual nem sempre é de fácil acesso.

Nesse sentido, a pergunta que norteia a presente pesquisa é:

- É possível determinar um modelo empírico geral para estimativa do volume bombeado diário por Sistemas Fotovoltaicos de Bombeamento que acoplam bombas centrífugas, motores de indução trifásicos e conversores de frequência?

1.2 OBJETIVO

A presente pesquisa tem por objetivo o desenvolvimento de um modelo empírico para a estimativa do volume diário de água bombeada por Sistemas Fotovoltaicos de Bombeamento que associam bombas centrífugas, motores de indução trifásicos e conversores de frequência, a partir de informações facilmente disponíveis em manuais técnicos de equipamentos (por exemplo, o módulo fotovoltaico) e de dados relativos à disponibilidade do recurso solar e às características hidrogeológicas locais.

1.3 JUSTIFICATIVA

A ocorrência de falhas de dimensionamento em projetos de bombeamento de água que utilizam a energia solar fotovoltaica culmina em diversos transtornos para as comunidades rurais. De acordo com [Gualteros e Rouse \(2021\)](#), caso haja um subdimensionamento do Sistema Fotovoltaico de Bombeamento, não haverá água suficiente para atender o consumo projetado para atividades campestres, como a pecuária (dessedentação animal) e a agricultura (irrigação de culturas), o que pode comprometer gravemente o desenvolvimento econômico rural. Dessa forma, é essencial que se desenvolvam técnicas que, ao mesmo tempo, estimem de maneira confiável o volume de água bombeado ao longo de um ciclo e sejam de fácil aplicação para projetistas e usuários do sistema.

Diversas propostas de modelos empíricos de predição da capacidade de bombeamento de água por Sistemas Fotovoltaicos de Bombeamento existentes na literatura, como a pesquisa desenvolvida por [Jafar \(2000\)](#) e [Balaj, Man e Paulescu \(2017\)](#), têm por objetivo prever a vazão bombeada em função da irradiância local. No entanto, ambas as variáveis equivalem a medições instantâneas e não a medidas integralizadas ao longo de um ciclo, como o volume e a irradiação. Essas grandezas integralizadas são justamente aquelas facilmente disponíveis e que podem ser utilizadas pelos projetistas como dados de entrada para o dimensionamento do Sistema Fotovoltaico de Bombeamento. Além disso, no estudo de [Balaj, Man e Paulescu \(2017\)](#), a equação empírica desenvolvida só é válida para condições de irradiância acima de $450 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$. No entanto, diversas motobombas têm capacidade de bombear água mesmo em níveis menores de irradiância, o que faz com que o modelo proposto não seja capaz de prever uma fração da vazão bombeada.

Há também pesquisas, como a de [Benghanem et al. \(2014\)](#), em que foram desenvolvidos modelos matemáticos que preveem o volume bombeado em função da irradiação global e da altura manométrica para uma bomba centrífuga de um determinado fabricante. Dessa forma, para cada uma das diferentes alturas manométricas analisadas, foram desenvolvidas regressões quadráticas que relacionam o volume bombeado e a irradiação. Complementarmente, para cada um dos diferentes níveis de irradiação global, construíram-se modelos quadráticos que estabelecem uma relação entre o volume bombeado e a altura manométrica. No entanto, tais equações desenvolvidas servem apenas para predição do volume diário bombeado para um modelo específico de motobomba. Além disso, essa modelagem permite a utilização apenas de combinações restritas de altura manométrica e irradiação para predição do volume bombeado e não leva em consideração variáveis de catálogo importantes como a potência do gerador fotovoltaico.

[Santos et al. \(2021\)](#) utilizaram perfis de irradiância e de temperatura da célula fotovoltaica, bem como informações técnicas disponíveis nos manuais do gerador FV (como a potência nominal e o coeficiente térmico de redução de potência), bomba (curva Vazão em função da Altura Manométrica e Vazão em função da Eficiência) e motor (curva de Eficiência em função da

Potência Nominal) para desenvolver um método capaz de determinar o ponto ótimo de operação de motobombas centrífugas em Sistemas Fotovoltaicos de Bombeamento e, ao mesmo tempo, estimar o volume de água bombeado ao longo de um ciclo. Complementarmente, a partir dos resultados obtidos com a aplicação dessa metodologia, os autores propuseram um procedimento de seleção de motobombas para atendimento de uma dada demanda a uma altura manométrica, passo essencial no processo de dimensionamento de Sistemas Fotovoltaicos de Bombeamento. No entanto, apesar dessa metodologia ser aplicável a qualquer tipo de motobomba, a utilização de equações analíticas para modelagem de geradores FV, bombas centrífugas e motores elétricos introduz uma complexidade ao processo de dimensionamento, visto que sua resolução pode exigir maiores recursos computacionais, os quais nem sempre estão disponíveis para os projetistas. Além disso, os dados de catálogo dos equipamentos são frequentemente divergentes em relação aos resultados obtidos em campo.

Diante dessas limitações e/ou complexidades expostas pelos estudos supracitados, a presente pesquisa tem por objetivo a proposição de um modelo empírico geral que, a partir da combinação de diferentes alturas manométricas, potências de gerador fotovoltaico e níveis de irradiação global, seja capaz de estimar, de maneira confiável, o volume de água bombeado ao longo de um ciclo para motobombas centrífugas submersas de potências variando entre 0,5 cv e 2 cv.

Dessa forma, como resultado do estudo, pretende-se que os projetistas fotovoltaicos tenham disponível uma ferramenta de cálculo prática e robusta, a fim de auxiliar o processo de dimensionamento de Sistemas Fotovoltaicos de Bombeamento. Além do modelo desenvolvido, são explicitadas as condições de contorno para as quais a equação desenvolvida no presente trabalho é válida. Por fim, um exemplo de aplicação do modelo proposto é descrito no Apêndice A.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

A dissertação está estruturada em cinco capítulos e um apêndice, os quais foram escritos em uma sequência que compreende Introdução (Capítulo 1), Revisão de Literatura (Capítulo 2), Materiais e Métodos (Capítulo 3), Resultados e Discussão (Capítulo 4), Conclusão (Capítulo 5) e Apêndice A.

O Capítulo 1 apresenta a contextualização, o problema e a pergunta de pesquisa, a justificativa de realização do estudo e também a estrutura da dissertação.

O Capítulo 2 aborda alguns fundamentos teóricos importantes para a realização do estudo. Dessa forma, discorre-se brevemente sobre as diferentes tecnologias de bombeamento de água, detalha-se a respeito dos sistemas fotovoltaicos de bombeamento e seus componentes e descreve-se a configuração utilizada no trabalho (associação de bombas centrífugas submersas, motores de indução trifásicos e conversores de frequência). Também discute-se o dimensiona-

mento dos componentes dos sistemas fotovoltaicos de bombeamento, evidenciando as variáveis de projeto importantes, as equações básicas e *softwares* que podem ser utilizados por projetistas.

O Capítulo 3 apresenta as etapas de realização do trabalho e a metodologia de execução dos ensaios, descreve as características técnicas dos equipamentos utilizados no experimento (geradores fotovoltaicos, motobombas, fontes de tensão estabilizada) e caracteriza a bancada experimental e a instrumentação utilizada para coletar e armazenar as medições efetuadas. Também é enunciada a hipótese da pesquisa e descrita a forma de tratamento dos dados coletados, bem como as ferramentas computacionais e testes estatísticos empregados no desenvolvimento e validação do modelo empírico proposto.

O Capítulo 4 apresenta e discute os resultados obtidos nas diferentes etapas realizadas, com destaque para as curvas características dos geradores fotovoltaicos e das motobombas e o modelo empírico e sua validação estatística.

O Capítulo 5 apresenta a conclusão e sugestões para trabalhos futuros.

O Apêndice A apresenta um exemplo prático de aplicação do modelo empírico proposto para o dimensionamento de Sistemas Fotovoltaicos de Bombeamento.

2 REVISÃO DE LITERATURA

O capítulo de Revisão de Literatura traz alguns fundamentos teóricos importantes associados ao tema do trabalho. Assim, são descritas as tecnologias de bombeamento de água, os Sistemas Fotovoltaicos de Bombeamento e seus componentes e também apresentadas as configurações de Sistemas Fotovoltaicos de Bombeamento compostas por motores de indução trifásicos, bombas centrífugas submersíveis e conversores de frequência. Por fim, aspectos relacionados ao dimensionamento de SFB são discorridos.

2.1 TECNOLOGIAS DE BOMBEAMENTO DE ÁGUA

Os sistemas de bombeamento de água podem ser acionados a partir de diferentes fontes de energia, dentre as quais estão o trabalho humano, combustíveis fósseis (como o diesel), vento e o sol. Os subtópicos a seguir discorrerão sobre cada um deles.

2.1.1 Sistemas de bombeamento manuais

O trabalho humano é utilizado para acionamento das bombas manuais. Tal tecnologia tem como vantagem seu baixo custo, fácil manutenção e não-utilização de combustíveis. Por outro lado, esse método demanda muito tempo e energia do operário, os quais poderiam ser empregados em outras tarefas, além de resultar em um baixo volume diário captado (FRAIDENRAICH; VILELA, 1999).

2.1.2 Sistemas de bombeamento acionados por motores a combustão interna

Uma alternativa ao trabalho humano é o uso de bombas acopladas a motores de combustão interna alimentados por combustíveis fósseis como o diesel. Dentre as vantagens desta opção estão a sua portabilidade, fácil instalação, custo inicial de baixo a moderado e a ampla disponibilidade de peças de reposição e de mão-de-obra especializada associadas à tecnologia. Por outro lado, os combustíveis utilizados podem apresentar preços elevados e problemas de abastecimento (em especial em regiões remotas), além de emitirem gases tóxicos e ruídos (MORALES, 2011).

2.1.3 Sistemas de bombeamento acionados pelos ventos

Os sistemas de bombeamento acionados através da energia eólica são uma tecnologia que apresenta baixo custo em regiões onde os regimes de vento são favoráveis, seus componentes apresentam elevada vida útil, não demandam o uso de combustíveis e nem supervisão para operarem. No entanto, esses sistemas têm seu desempenho afetado pela variabilidade do recurso eólico, além de requerem a implementação de um reservatório de água para atender a demanda em períodos com menores velocidades de vento (MORALES, 2011). Ademais, os

sistemas de bombeamento eólico apresentam uma maior necessidade de manutenção (especialmente de seus componentes mecânicos) e também provocam alguns impactos ambientais como poluição visual e ruídos mecânicos e aerodinâmicos. (GOPAL *et al.*, 2013).

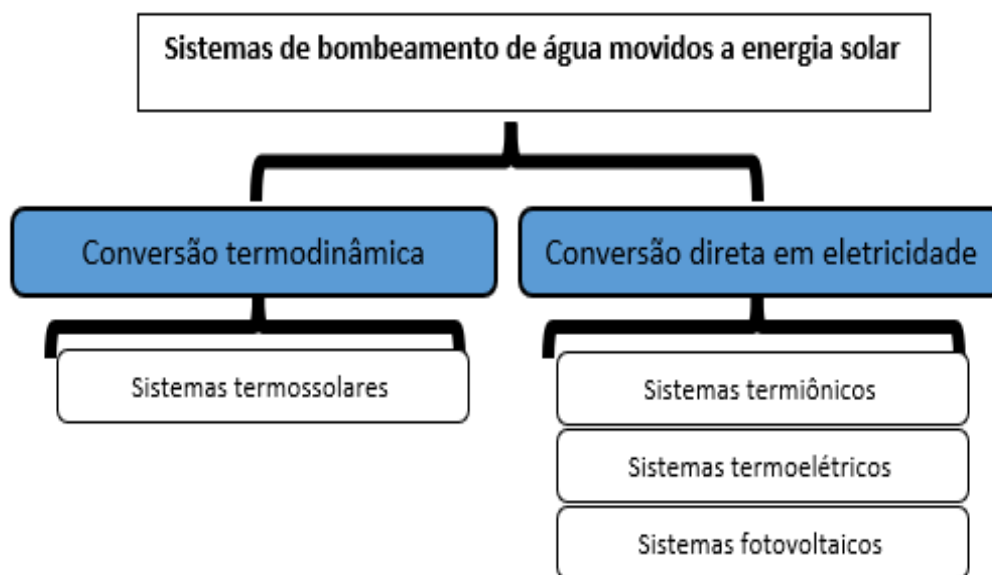
2.1.4 Sistemas de bombeamento elétrico acionados pela rede elétrica convencional

De acordo com Morales (2011), os sistemas de bombeamento que operam a partir da eletricidade proveniente da rede convencional de energia possuem um baixo custo de implementação (caso a localidade tenha acesso à rede), operação e manutenção, além de seus componentes (como motores) e peças de reposição serem comercialmente difundidos. No entanto, os principais limitantes desta opção são a dependência do acesso à rede elétrica até o ponto de consumo, o qual pode ser inviável em determinadas regiões devido a questões de custo financeiro e ambiental, e também a necessidade de mão de obra especializada para manutenção da rede elétrica.

2.1.5 Sistemas de bombeamento acionados por energia solar

De acordo com Bahadori (1978), os sistemas de bombeamento acionados a partir de energia solar podem ser de dois tipos principais: os que utilizam conversões termodinâmicas, como os sistemas termosolares de bombeamento, e aqueles que empregam conversão direta da energia do sol em eletricidade para acionamento do motor elétrico acoplado à bomba, tais como os sistemas termiônicos, os sistemas termoelétricos e os fotovoltaicos de bombeamento (SFB). As tipologias de sistemas de bombeamento de água movido a energia solar estão esquematizadas na Figura 2.1.

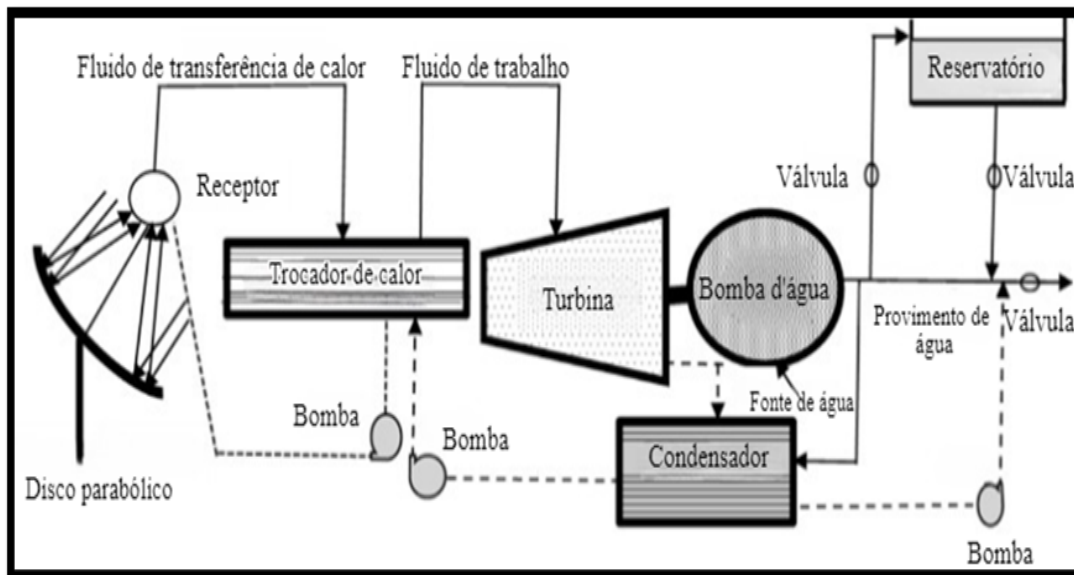
Figura 2.1 – Diferentes sistemas de bombeamento solar acionados por fonte primária solar.



2.1.5.1 Sistemas Termossolares de Bombeamento

Segundo [Gopal et al. \(2013\)](#), os sistemas termossolares de bombeamento, esquematizados na Figura 2.2, têm como princípio básico de funcionamento a utilização de coletores e concentradores solares para capturar a energia térmica do Sol, a qual é empregada no aquecimento e pressurização de um fluido de trabalho. Tal fluido pode ser utilizado em diferentes ciclos termodinâmicos para converter energia térmica em energia mecânica, esta última utilizada para o acionamento da bomba. Dentre os sistemas termossolares de bombeamento baseados em ciclos termodinâmicos estão os que utilizam os ciclos Rankine, Brayton e Stirling. Complementarmente, existem os sistemas termossolares de bombeamento baseados em hidretos metálicos, os quais utilizam a sorção e dessorção térmica de hidrogênio para promover alterações na pressão de pistões, permitindo, assim, o bombeamento de água.

Figura 2.2 – Componentes de um sistema de bombeamento termossolar.



Fonte: Adaptado de [Ali \(2018\)](#).

No entanto, a utilização comercial de sistemas termossolares de bombeamento ainda é menos vantajosa do que o uso de sistemas fotovoltaicos de bombeamento, visto que os sistemas termossolares apresentam componentes de elevado custo (como concentradores) e utilizam mecanismos de funcionamento ainda complexos e menos eficientes para bombear água, como o ciclo Rankine orgânico e os baseados na sorção e dessorção de hidrogênio ([HILARYDOSS, 2023](#)).

2.1.5.2 Sistemas Termoiônicos de Bombeamento

Segundo [Halcrow \(1981\)](#), os sistemas termoiônicos de bombeamento tem como princípio de funcionamento o aquecimento a elevadas temperaturas (acima de 1000 °C) de uma

superfície catódica emissora de elétrons dentro de um gás ionizado a baixa pressão ou de um vácuo. Tal elevação de temperatura faz com que os elétrons sejam emitidos e atinjam uma superfície anódica fria posicionada próxima à catódica, de forma a gerar corrente elétrica. No entanto, os requisitos térmicos destes sistemas fazem com que sua utilização para sistemas de bombeamento de água não tenha um grande potencial, especialmente em aplicações de pequena escala.

2.1.5.3 Sistemas Termoelétricos de Bombeamento

[Hilarydoss \(2023\)](#) afirma que os sistemas termoelétricos de bombeamento operam com base no efeito Seebeck, no qual a diferença de temperatura existente entre a superfície quente e a fria do gerador termoelétrico permite a produção de eletricidade, utilizada para acionar motores elétricos e, assim, a bomba para movimentação do fluido. A vantagem desse sistema é que ele é capaz de utilizar qualquer calor rejeitado para produzir eletricidade. Por outro lado, os geradores termoelétricos apresentam uma eficiência de conversão reduzida (cerca de 5%) e são mais caros do que os módulos fotovoltaicos.

2.1.5.4 Sistemas Fotovoltaicos de Bombeamento (SFB)

Os sistemas fotovoltaicos de bombeamento utilizam módulos fotovoltaicos para captar energia luminosa do Sol e convertê-la em eletricidade. Quando esta energia elétrica chega até o motor, ele a transforma em energia mecânica que, por sua vez, é utilizada por uma bomba para fornecer a energia hidráulica necessária para bombear um certo volume de água a uma determinada altura manométrica ([CHANDEL; NAIK; CHANDEL, 2015](#)).

De acordo com [Fedrizzi \(1997\)](#), [Morales \(2011\)](#) e [Li et al. \(2017\)](#), a opção solar fotovoltaica para bombeamento de água tem como vantagens: operação autônoma; longa vida útil do gerador fotovoltaico (20 a 30 anos); não utilização de combustíveis; caráter modular do sistema, o que permite fácil ampliação do projeto; baixa necessidade e reduzidos custos de manutenção de seus componentes; baixo impacto ambiental durante a geração de energia; a existência de uma boa relação entre disponibilidade energética e demanda hídrica e a facilidade de instalação e portabilidade dos equipamentos.

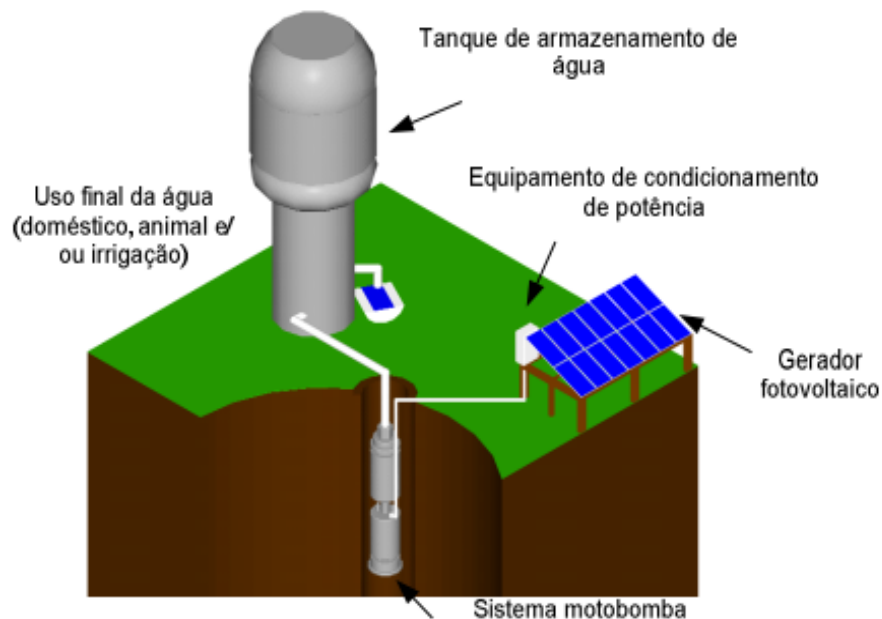
Além disso, no caso do Brasil, a reposição de peças de componentes de SFB tem sido facilitada com a utilização de conversores de frequência de fabricação nacional associados a motobombas convencionais de corrente alternada ([MORALES et al., 2016](#)). Outro aspecto positivo é que, apesar dos custos iniciais de sistemas fotovoltaicos de bombeamento serem maiores do que aqueles que empregam motobombas a combustão interna, o período de retorno do investimento (*payback*) para este tipo de projeto pode ser menor que 2 anos ([NEPOMUCENO; MAIA; TEIXEIRA, 2018](#)), dependendo do preço dos combustíveis alternativos (diesel, gasolina).

Por outro lado, o funcionamento dos SFB é dependente das condições atmosféricas locais, o que implica na necessidade de uso de reservatórios de água ou baterias para suprimento em períodos nublados, por exemplo. Outro aspecto negativo é que os componentes dos SFB são vulneráveis a furtos e ao vandalismo. Além disso, não há, em muitos países do mundo, normativas para assegurar a qualidade dos sistemas antes e após esses serem instalados (HARTUNG; PLUSCHKE, 2018).

2.2 SISTEMAS FOTOVOLTAICOS DE BOMBEAMENTO (SFB)

Os SFB são constituídos por diversos componentes, dentre eles o gerador fotovoltaico, os dispositivos de condicionamento de potência, o conjunto motobomba e os equipamentos complementares, como sistemas de armazenamento, fiações, tubulações e estruturas de suporte. A Figura 2.3 ilustra os componentes supramencionados.

Figura 2.3 – Desenho esquemático dos componentes de Sistemas Fotovoltaicos de Bombeamento.



Fonte: Adaptado de Melendez (2009).

Os geradores fotovoltaicos comerciais em SFB são constituídos por silício amorfo, monocristalino e policristalino, além de poderem ser montados em uma estrutura fixa ou móvel. Os dispositivos de condicionamento de potência podem ser diodos, reguladores de carga, conversores c.c.-c.c., *boosters*, inversores c.c.-c.a., seguidores do ponto de máxima potência (MPPT) e conversores de frequência.

O conjunto motobomba, que compreende a bomba e o motor, pode ser classificado em submerso, flutuante e de superfície (FEDRIZZI, 1997; MORALES, 2011). Segundo Eletrobrás *et al.* (2009a), as bombas podem ser de deslocamento positivo ou dinâmicas. As primeiras se

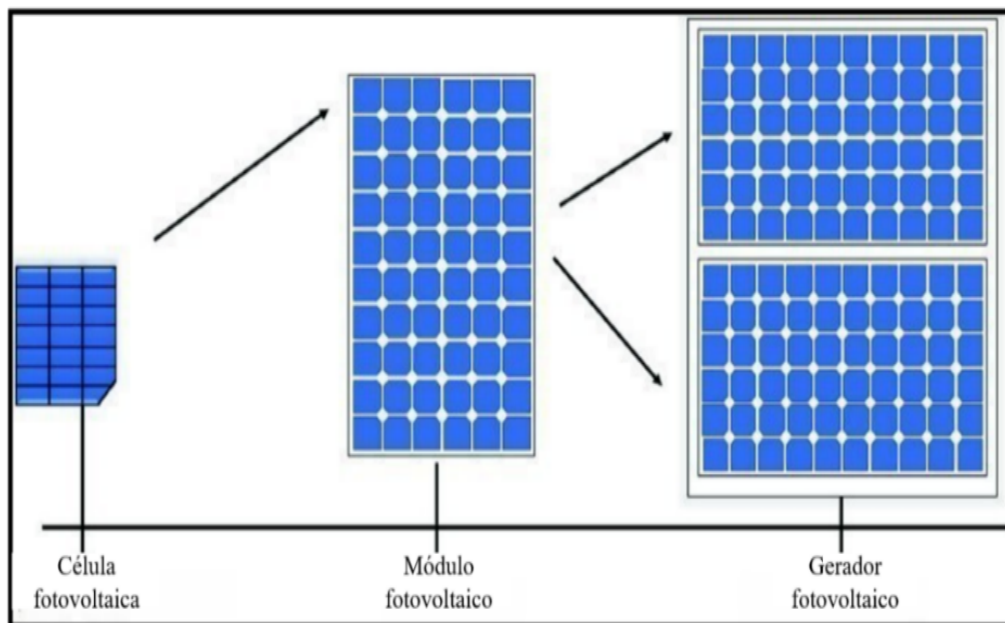
subdividem em bombas de alternativas ou rotativas; já as últimas podem ser centrífugas do tipo radial, axial e mista. Os motores elétricos são divididos em motores de corrente contínua (motor c.c.) ou alternada (motor c.a.). Os motores c.c. podem ser de ímã permanente (que podem ou não utilizar escovas) ou de bobinas de campo (em série ou em paralelo com as bobinas da armadura). Por outro lado, os motores c.a. podem ser síncronos ou assíncronos, estes últimos ainda subdivididos em monofásicos ou trifásicos (ELETROBRÁS *et al.*, 2009b). Em relação aos sistemas de armazenamento, podem ser utilizados os reservatórios de água e as baterias (FEDRIZZI, 1997; MORALES, 2011).

Os subtópicos seguintes discorrem de maneira mais detalhada sobre cada um dos componentes de um SFB.

2.2.1 Gerador Fotovoltaico

O gerador fotovoltaico é composto por um ou mais módulos fotovoltaicos e estes são constituídos por um conjunto de células fotovoltaicas (Figura 2.4).

Figura 2.4 – Ilustração dos conceitos de célula, módulo e gerador fotovoltaico.



Fonte: Adaptado de Shah (2020).

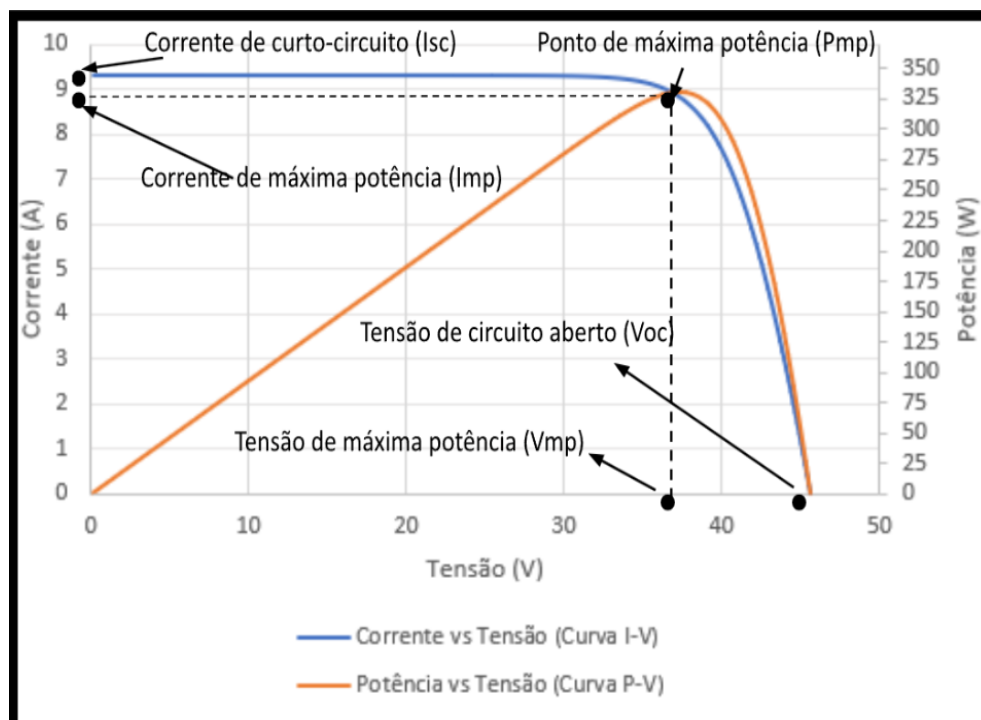
As células fotovoltaicas são constituídas por materiais semicondutores, os quais possuem uma banda de valência (contendo elétrons) e outra de condução (contendo lacunas). Essas duas bandas energéticas são separadas, e entre elas, situa-se a banda proibida ou gap, E_g . Quando um fóton proveniente da radiação solar com energia superior à da energia da banda proibida do semicondutor é absorvido pela célula solar, são gerados pares elétrons-lacuna que, ao se moverem, formam a corrente elétrica, configurando o chamado efeito fotovoltaico. Para que esse fenômeno aconteça, é necessário que sejam introduzidos dopantes no material se-

micondutor, permitindo a criação da junção p-n que, além de separar os portadores de carga (elétrons e lacunas), possibilitam também a formação de uma diferença de potencial.

Dentre os elementos semicondutores utilizados na fabricação de células fotovoltaicas estão o silício, germânio, gálio, selênio, arsênio, índio, cobre, cádmio e gálio. Já as tecnologias de células fotovoltaicas existentes vão desde aquelas compostas por silício monocristalino (mono-Si), multicristalino (multi-Si) e amorfo (a-Si) até aquelas de telureto de cádmio (CdTe) e de cobre-índio-gálio-selênio (CIGS). O tipo de célula solar predominante no mercado é a de silício mono e policristalino, enquanto outras tecnologias ainda possuem uma participação tímida. Em 2020, o silício monocristalino correspondia a quase 80% da produção mundial de células e o policristalino a cerca de 15% (PHILIPPS; FRAUNHOFER; WARMUTH, 2022).

De acordo com Pinho e Galdino (2014), as células fotovoltaicas comerciais de silício cristalino (mono e policristalino) produzem uma tensão de circuito aberto (V_{oc}) entre 0,5 e 0,7 V e uma densidade de corrente de curto-circuito (I_{sc}) entre 38 e 42,7 mA/cm². Os principais parâmetros elétricos de uma célula fotovoltaica de silício podem ser obtidos a partir de suas curvas I-V (Corrente em função da Tensão) e P-V (Potência em função da Tensão), conforme ilustrado na Figura 2.5.

Figura 2.5 – Curvas características de módulo fotovoltaico de silício cristalino de 72 células.



Fonte: Autoria própria a partir de dados de Yingli Solar (2019).

Diante dessas características, é necessário associar as células fotovoltaicas em série para atingir tensões de operação adequadas às aplicações fotovoltaicas. O conjunto de células encapsuladas formam o módulo fotovoltaico. Os módulos devem ser conectados em série ou em

paralelo a fim de atender os parâmetros elétricos de operação do conjunto motobomba.

2.2.1.1 Fatores associados ao gerador fotovoltaico que influenciam o desempenho do sistema de bombeamento

Segundo [Li et al. \(2017\)](#), a capacidade de produção diária de água de SFB está diretamente ligada ao gerador fotovoltaico e aos fatores que o influenciam. Dentre tais fatores estão a orientação e o ângulo de inclinação dos módulos fotovoltaicos, utilização de mecanismos de seguimento e concentração solar, bem como o arranjo e o tamanho do gerador fotovoltaico.

De acordo com [Morales \(2011\)](#), o gerador fotovoltaico deve ser orientado para o Norte em localidades do Hemisfério Sul e para o Sul em locais do Hemisfério Norte. Em relação ao posicionamento do gerador em sistemas de estrutura fixa, [Li et al. \(2017\)](#) e [Wenham et al. \(2007\)](#) afirmam que o ângulo de inclinação que otimiza a produção diária de água em SFB depende do perfil da demanda ao longo do ano, que varia em função da aplicação a ser atendida (consumo humano, irrigação, pecuária). De acordo com [Morales e Busch \(2010\)](#), para maximizar a produção anual de energia e, conseqüentemente, o volume de água bombeado ao longo do ano é necessário que o ângulo de inclinação do gerador fotovoltaico seja igual à latitude local. Por outro lado, caso as maiores demandas hídricas estejam no verão, o ângulo de inclinação indicado para o gerador indicado é igual a latitude $- 15^\circ$; já para otimizar a produção de água no inverno, este ângulo deve ser igual a latitude $+ 15^\circ$.

Os SFB com estrutura móvel utilizam mecanismos de seguimento solar para maximizar a captação do recurso solar pelo gerador fotovoltaico e, assim, a produção diária de água ([MORALES, 2011](#)). De acordo com [Caton \(2014\)](#), os seguidores solares podem ser classificados em função do seu número de graus de liberdade e frequência de ajustamento. Em relação à primeira forma de classificação, os seguidores podem ser uniaxiais (de eixo vertical, eixo Leste-Oeste, eixo Norte-Sul e de eixo polar) ou biaxiais. Em termos de frequência de ajuste, os sistemas de seguimento solar podem ser de ajuste contínuo (o que exige automação) ou discreto (com ajustes manuais em diferentes escalas temporais – diário, semanal ou mensal).

[Vilela, Fraidenraich e Tiba \(2003\)](#) desenvolveram um estudo a fim de mensurar os ganhos de volume bombeado decorrentes da utilização de seguidores solares uniaxiais de eixo Leste-Oeste acoplados a Sistemas Fotovoltaicos de Bombeamento. A partir de testes experimentais, foram observados, para irradiações de 5 e 6 kWh.m⁻², incrementos de 37 e 41% de volume bombeado por meio de seguidores solares comparados a um sistema fixo. [Bione, Vilela e Fraidenraich \(2004\)](#) avaliaram a capacidade de produção de água de três configurações de SFB: um sistema fixo, outro composto por seguidor uniaxial de eixo Norte-Sul e o último contendo um concentrador do tipo V. Em comparação ao sistema fixo, a utilização de seguidor de eixo único resultou em um aumento de 41% do volume bombeado; já o emprego de concentrador solar resultou em um volume 149% maior.

O arranjo do gerador fotovoltaico compreende a maneira com que os módulos são conectados em série, em paralelo ou em uma combinação série-paralelo, e interfere diretamente na capacidade de produção de água e no desempenho do Sistema Fotovoltaico de Bombeamento, conforme evidenciado em [Benghanem et al. \(2013\)](#) e [Tiwari et al. \(2021\)](#).

[Benghanem et al. \(2013\)](#) desenvolveram um estudo experimental, sob as condições climáticas de Madinah (Arábia Saudita), a fim de mensurar o desempenho de um conjunto motobomba helicoidal de corrente contínua utilizando quatro diferentes configurações ou arranjos de módulos fotovoltaicos em ensaios a uma altura manométrica de 80 m.c.a.: PV1 (18 módulos conectados em 3 *strings* (fileiras) em paralelo com 6 módulos em série cada), PV2 (24 módulos conectados em 2 fileiras em paralelo com 12 módulos em série cada), PV3 (18 módulos ligados em 3 fileiras em paralelo com 6 módulos em série cada) e PV4 (18 módulos ligados em 4 fileiras em paralelo com 4 módulos em série cada). Os autores observaram que a configuração PV3 apresentou a maior eficiência média do conjunto motobomba (45,06%) e um volume bombeado de 22 m³.

[Tiwari et al. \(2021\)](#), por meio da modelagem matemática de componentes de Sistemas Fotovoltaicos de Bombeamento no *software MatLab* associada à utilização de dados de perfil de irradiância de Nagpur (Índia), realizaram uma comparação do desempenho global e da vazão bombeada de cinco configurações de Sistemas Fotovoltaicos de Bombeamento: 4S x 3P (3 fileiras em paralelo com 4 módulos em série cada); 2S x 6P (6 fileiras em paralelo com 2 módulos em série cada); 6S x 2P (2 fileiras em paralelo com 6 módulos em série cada); 3S x 4P (4 fileiras em paralelo com 3 módulos em série cada) e, por fim, 12S (1 fileira com 12 módulos em série). As simulações foram feitas em diferentes alturas manométricas e considerando características de bombas centrífugas associadas a motor de corrente contínua. Os modelos obtidos revelam que, para uma altura manométrica de 27 m.c.a., a configuração que resulta em maior volume bombeado é a 6S x 2P, com um desempenho global máximo de 6%.

De acordo com [Li et al. \(2017\)](#), a eficiência global de um Sistema Fotovoltaico de Bombeamento depende também do tamanho do gerador fotovoltaico, ou seja, da potência nominal da associação de módulos. Nesse sentido, o aumento da potência do gerador resulta em incrementos no desempenho do sistema apenas até um dado patamar de acréscimo da capacidade do gerador. Elevações adicionais da potência nominal do gerador em que o sistema é alimentado provoca reduções na eficiência do sistema.

Um exemplo disso é ilustrado pelo estudo desenvolvido por [Odeh, Yohanis e Norton \(2006\)](#). Os autores, a partir do processamento de dados horários de irradiação média ao longo de um ano para a cidade de Ritem (Jordânia) e da modelagem de componentes de Sistemas Fotovoltaicos de Bombeamento dentro do *software TRNSYS*, avaliaram a eficiência média do conjunto motobomba, do gerador fotovoltaico e a global do sistema em diferentes alturas manométricas e tamanhos de geradores fotovoltaicos (1800 W_p, 2700 W_p, 3600 W_p, 4500 W_p, 6300 W_p e 7200 W_p). As simulações foram realizadas considerando um conjunto motobomba

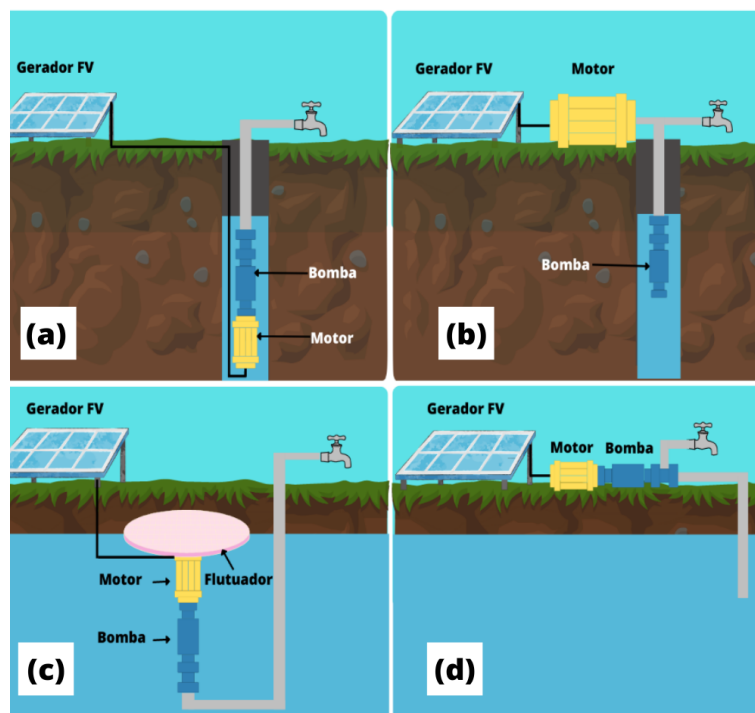
formado por uma bomba centrífuga e um motor de indução de corrente alternada de 2,2 kW. Para a altura manométrica de maior eficiência global do sistema (28 m.c.a.), verificou-se que a potência nominal do gerador fotovoltaico que apresentou o melhor desempenho global foi a de 3600 W_p e que, para maiores tamanhos de gerador, tal eficiência se reduz.

2.2.2 Conjunto Motobomba

O conjunto motobomba, composto por uma bomba acoplada a um motor elétrico, tem a função de transformar a energia elétrica produzida pelo gerador fotovoltaico em energia mecânica. Segundo [Brahmi et al. \(2018\)](#), grande parte das bombas comerciais apresentam uma eficiência de 45 a 65% e os motores apresentam um desempenho típico que varia entre 75 e 85%. Dessa forma, a eficiência do conjunto motobomba está entre 34 e 55%.

De acordo com [Fedrizzi \(1997\)](#), os conjuntos motobombas podem ser classificados em quatro configurações principais de posicionamento: (a) grupo motobomba em posição submersa; (b) bomba submersa e motor em superfície; (c) grupo motobomba flutuante e (d) grupo motobomba em superfície. Tais configurações de posicionamento estão ilustradas na Figura 2.6.

Figura 2.6 – Configurações de posicionamento de Sistemas Fotovoltaicos de Bombeamento.



Fonte: Autoria própria (2023).

Segundo [Practical Action \(2010\)](#), a configuração (a) é geralmente utilizada para extração de água de poços profundos por meio de bombas centrífugas multiestágios ou bomba de deslocamento positivo helicoidais e tem como vantagem a maior proteção contra danos e eventos adversos nos equipamentos e menor possibilidade de contaminação do recurso hídrico. A

configuração (b), apesar de permitir o fácil acesso ao motor para possíveis reparos, é pouco utilizada em função de sua baixa eficiência e do seu elevado custo de instalação. Na configuração (c), o grupo motobomba está colocado sobre flutuadores versáteis, permitindo sua portabilidade e reduzindo a possibilidade de o conjunto trabalhar “a seco”. Dessa forma, ela pode ser utilizada para extrair água em reservatórios com altura ajustável (MEAH; ULA; BARRETT, 2008). Nesta configuração, utilizam-se comumente bombas centrífugas de estágio único acopladas a um motor de corrente contínua sem escovas (PRACTICAL ACTION, 2010). A configuração (d) é utilizada para extração de água de rios, poços rasos, lagoas e tanques (MEAH; ULA; BARRETT, 2008) e geralmente apresentam limitações relativas à sua capacidade de sucção, o que faz com que elas sejam recomendadas para aplicações em que o Sistema Fotovoltaico de Bombeamento deve prover água em baixas alturas manométricas (entre 3 e 6 metros). Além disso, por estar exposto ao ambiente externo, o conjunto motobomba torna-se mais vulnerável a eventos climáticos extremos. Podem ocorrer também problemas de cavitação e de perdas do fluido (água) de escorva da bomba, o que pode ocasionar a queima do motor. Adicionalmente, essa configuração do grupo motobomba é menos eficiente e com maior custo de instalação (SONTAKE; KALAMKAR, 2016).

Os subtópicos seguintes explicam, em maiores detalhes, a respeito das bombas e dos motores utilizados em Sistemas Fotovoltaicos de Bombeamento.

2.2.2.1 Bombas

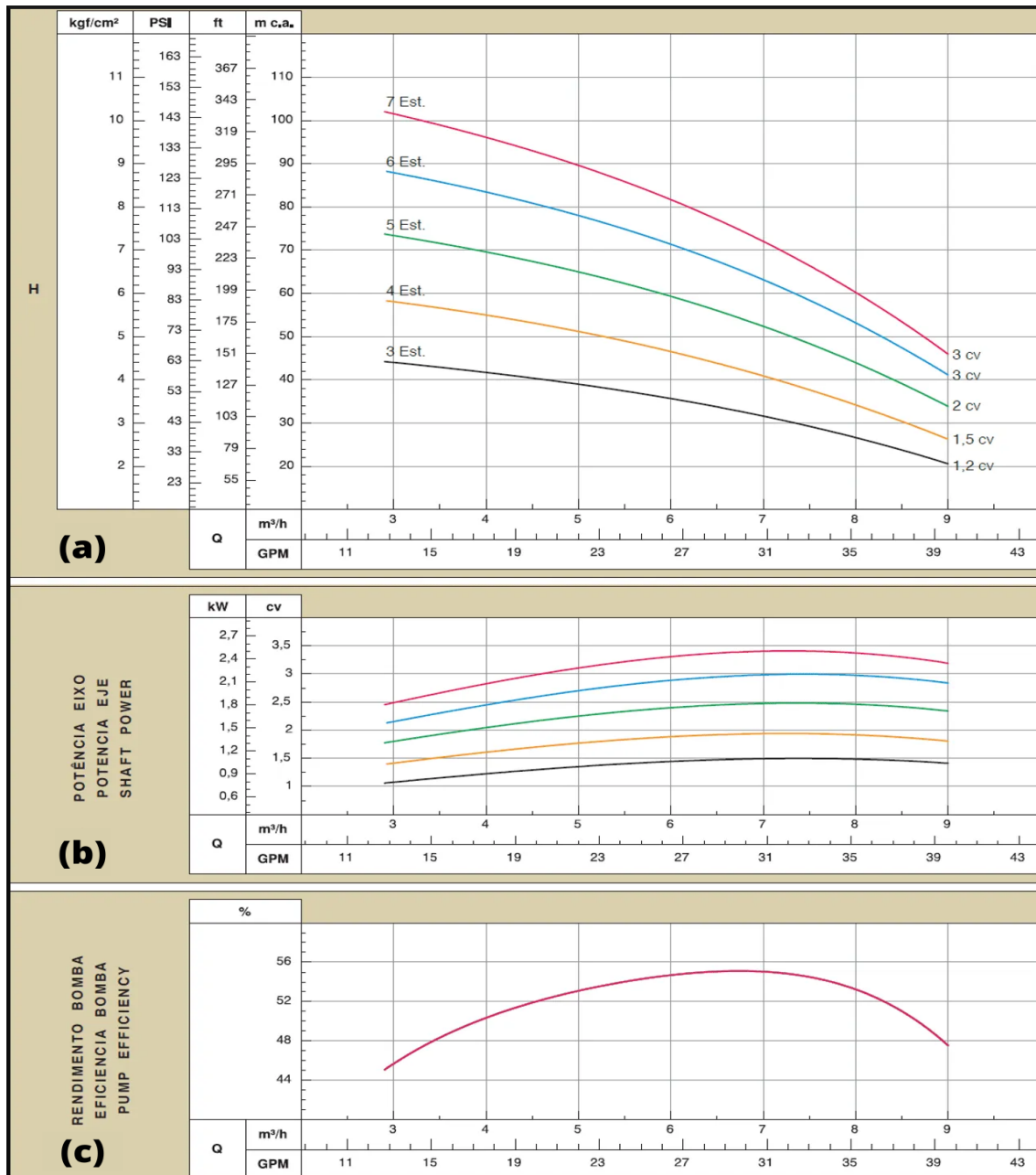
Uma bomba é um equipamento hidráulico capaz de transferir a energia mecânica fornecida por uma fonte motora qualquer para um determinado fluido na forma de energia cinética e de pressão, de forma a aumentar a pressão e a velocidade de deslocamento do líquido.

Segundo Chandel, Naik e Chandel (2015), de acordo com o princípio de funcionamento, as bombas são classificadas em dois grupos principais: as bombas dinâmicas e as bombas de deslocamento positivo. De acordo com Karassik (2008), o funcionamento das bombas dinâmicas envolve a adição contínua de energia, a fim de aumentar a velocidade do fluido dentro da máquina até que se atinja valores maiores do que os que ocorreriam na saída da bomba. Quando isso acontece, uma parcela da energia cinética é convertida em energia hidráulica, o que provoca a elevação da pressão do fluido e a redução de sua velocidade no interior ou na saída da bomba. Por outro lado, as bombas de deslocamento positivo permitem a movimentação do fluido a partir da aplicação periódica de forças sobre fronteiras móveis que contêm volumes fixos de água. Essa adição de energia promove a elevação da pressão no fluido, permitindo seu deslocamento até a saída da bomba.

O comportamento das bombas durante sua operação pode ser descrito por meio de suas curvas características. Tais curvas são determinadas experimentalmente pelos fabricantes e expressam a vazão bombeada em função de diferentes variáveis, como a altura manométrica, a potência consumida e o rendimento da bomba (ELETROBRÁS *et al.*, 2009a). A Figura 2.7

exemplifica as curvas características de uma bomba centrífuga multiestágios comercial.

Figura 2.7 – Curvas características de bomba centrífuga nacional: (a) Vazão em função da Altura Manométrica; (b) Vazão em função da Potência consumida pela bomba; (c) Vazão em função da Eficiência da bomba.



Fonte: Schneider (2022a).

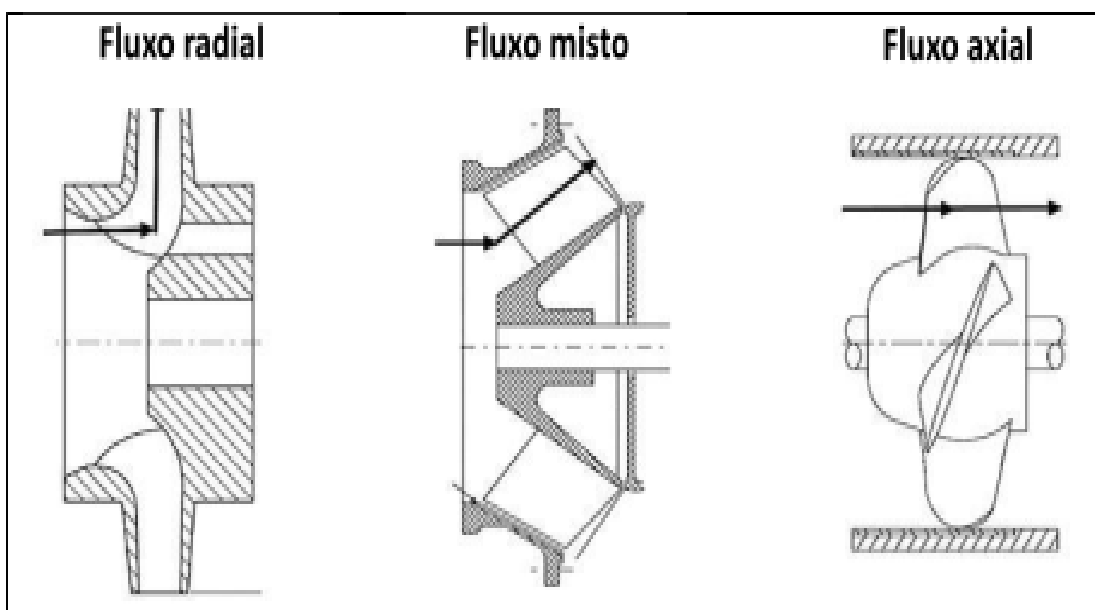
Nos subtópicos a seguir são descritos os diferentes tipos de bombas dinâmicas (bombas centrífugas) e de deslocamento positivo (bombas alternativas ou rotativas).

2.2.2.1.1 Bombas dinâmicas

De acordo com [Eletrobrás et al. \(2009a\)](#), as bombas centrífugas são máquinas hidráulicas que permitem a movimentação da massa do fluido por meio da rotação de um eixo contendo um ou mais impulsores dotados de pás. Tal deslocamento é realizado pela ação da força centrífuga: o fluido é recebido no centro do rotor ou impulsor que, ao girar, direciona a água pela periferia até a saída da bomba.

As bombas centrífugas podem ser classificadas em função do sentido de saída do líquido pelo rotor em radial, axial e de fluxo misto (Figura 2.8). Nas bombas centrífugas radiais, a movimentação do fluido ocorre na direção perpendicular ao eixo de rotação; nas centrífugas axiais, tal deslocamento dá-se paralelamente ao eixo de rotação e nas centrífugas de fluxo misto, o fluido movimenta-se na direção diagonal em relação ao eixo de rotação ([ELETROBRÁS et al., 2009a](#)).

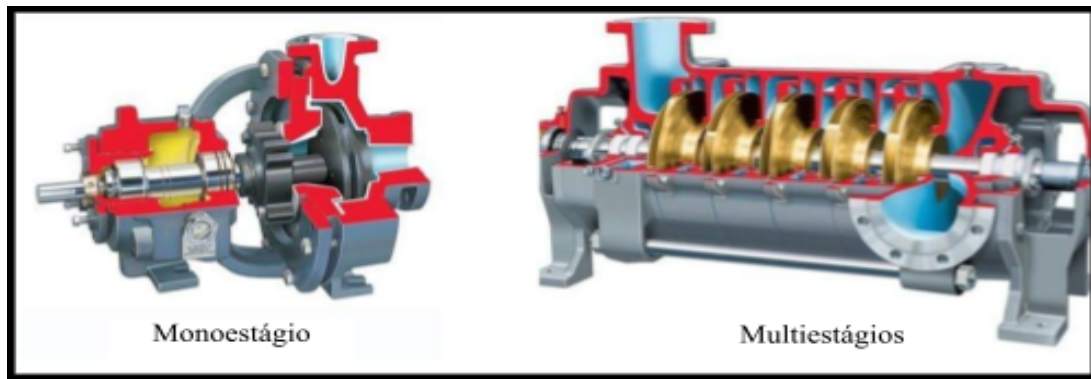
Figura 2.8 – Classificação das bombas centrífugas quanto a trajetória do fluxo.



Fonte: Adaptado de [Hydraulic Institute \(2019\)](#).

As bombas centrífugas são mais recomendadas para aplicações que requerem o fornecimento de grandes vazões a menores pressões, visto que elas apresentam maiores eficiências para vazões acima de $2,4 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ e alturas manométricas menores do que 40 m. A fim de possibilitar o bombeamento de água a pressões mais elevadas, as bombas centrífugas podem apresentar múltiplos estágios, cada qual contendo um impulsor. Cada estágio adicionado, apesar de permitir o incremento da altura manométrica de bombeio, pode provocar perdas energéticas de até 5% ([FOSTER; GHASSEMI; COTA, 2009](#)). A Figura 2.9 ilustra os dois tipos de bombas centrífugas existentes quanto ao número de impulsores: monoestágio (apenas um impulsor) e multiestágio (vários impulsores).

Figura 2.9 – Classificação das bombas centrífugas quanto ao número de estágios.



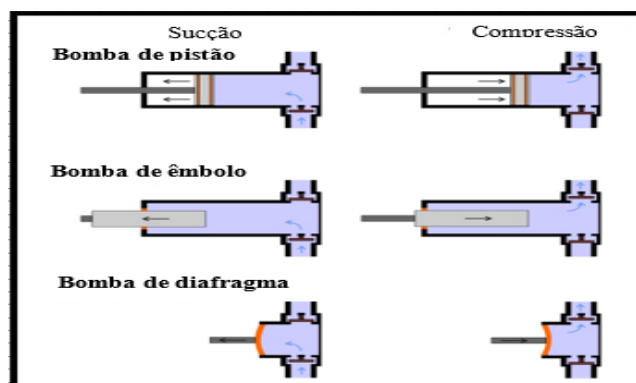
Fonte: Adaptado de [HardHat Engineer \(2020\)](#).

Segundo [Wenham et al. \(2007\)](#), as bombas centrífugas apresentam uma elevada eficiência quando operam em seu ponto ótimo de trabalho. Além disso, são equipamentos simples, robustos, de baixo custo e confiáveis. Por outro lado, as bombas centrífugas têm sua eficiência diminuída significativamente em situações em que a velocidade de rotação do seu rotor é reduzida, por exemplo, em períodos de baixa irradiância ([WENHAM et al., 2007](#)).

2.2.2.1.2 Bombas de deslocamento positivo

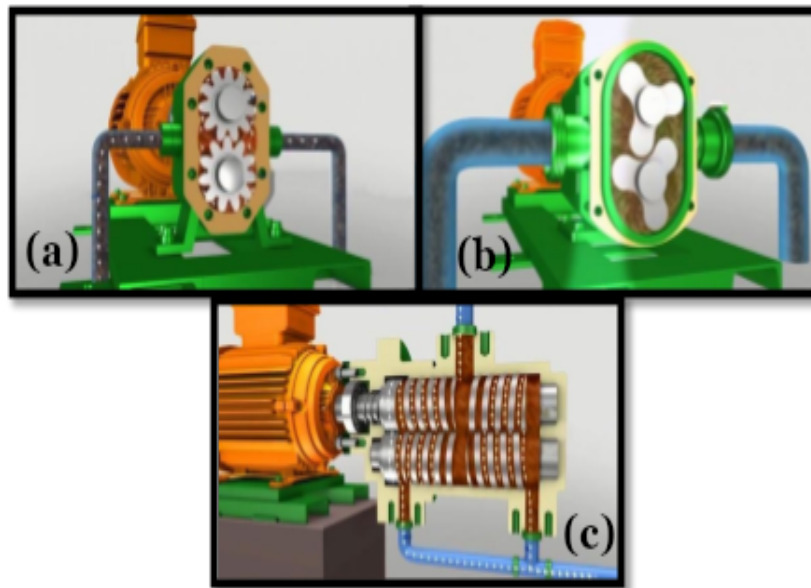
Segundo [Eletrobrás et al. \(2009a\)](#), as bombas de deslocamento positivo podem ser classificadas em alternativas e rotativas, em função do tipo de dispositivo mecânico de impulsão que elas empregam. De acordo com [Stewart \(2018\)](#), as bombas alternativas são aquelas em que o deslocamento do fluido é provocado pela movimentação linear de um pistão, diafragma ou êmbolo dentro de um cilindro (Figura 2.10). Por outro lado, as bombas rotativas realizam a movimentação do fluido a partir do movimento rotacional de engrenagens, lóbulos e parafusos (Figura 2.11).

Figura 2.10 – Tipologias de bombas de deslocamento positivo alternativas.



Fonte: Adaptado de [Michael Smith Engineers \(2022\)](#).

Figura 2.11 – Tipologias de bombas de deslocamento positivo rotativas: (a) engrenagem; (b) lóbulos; (c) parafuso.



Fonte: Fahad (2020).

De acordo com [Wenham et al. \(2007\)](#), as bombas de deslocamento positivo são mais recomendadas para aplicações que demandam que baixas vazões sejam bombeadas a elevadas pressões, como poços profundos. De maneira geral, o desempenho desse tipo de bombas quase não é influenciado pela altura manométrica, além de serem mais eficientes que as bombas centrífugas, inclusive em condições de baixa irradiância. Por outro lado, para menores alturas manométricas, seu desempenho tende a ser baixo, devido às perdas por atrito.

A vazão bombeada por essas máquinas apresenta uma relação de proporcionalidade direta com a velocidade de rotação do rotor e, assim, o torque requerido é mantido aproximadamente constante. Esta característica praticamente impossibilita que as bombas de deslocamento positivo sejam acopladas diretamente ao gerador fotovoltaico, visto que a corrente fornecida ao motor acoplado à bomba varia em função da irradiância ([WENHAM et al., 2007](#)). Nesse sentido, a utilização desse tipo de bombas requer a incorporação de outros componentes, como dispositivos de condicionamento de potência e Sistemas de Seguimento do Ponto de Máxima Potência – MPPT ([CHANDEL; NAIK; CHANDEL, 2015](#)).

2.2.2.2 Motores elétricos

O motor elétrico é um dispositivo com capacidade de converter eletricidade em energia mecânica, sendo utilizado em diferentes aplicações, em função de sua adaptabilidade à variadas cargas, construção simplificada e de sua boa eficiência. [Pinho e Galdino \(2014\)](#) mencionam que a seleção do tipo de motor elétrico adequado deve levar em conta diferentes variáveis de projeto

tais como o custo (geralmente mais elevado para motores de corrente contínua), a potência requerida pelo SFB para atingir uma dada altura manométrica, o volume diário de água desejado, a necessidade ou não de submersão do motor, a disponibilidade de operários para manutenção, entre outros.

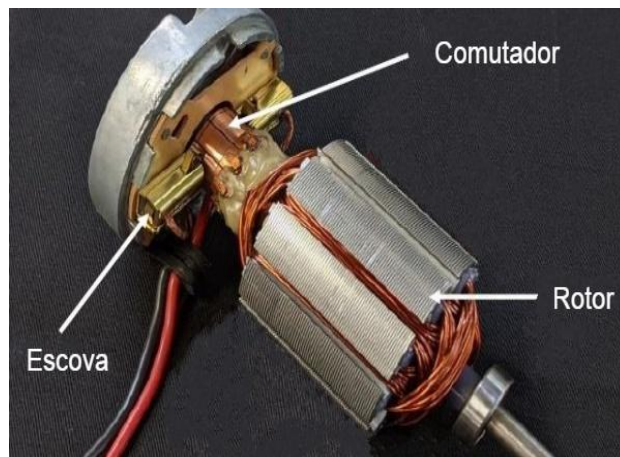
Nos subtópicos a seguir serão melhor descritos os diferentes tipos de motores utilizados em SFB.

2.2.2.2.1 Motores elétricos de corrente contínua

Segundo [Wenham et al. \(2007\)](#), os motores elétricos de corrente contínua podem ser divididos em motores em série, motores *shunt* e motores de ímã permanente sem e com escovas. Os motores em série e *shunt* são compostos por bobinas de campo magnético conectados, respectivamente, em série e em paralelo com os enrolamentos da armadura do motor. No entanto, a fim de substituir a utilização de bobinas de campo, foram desenvolvidos os motores de ímã permanente. Estes magnetos permitem a produção de um fluxo magnético constante, que não depende da radiação incidente e da corrente fotogerada, o que faz com que o desempenho do motor seja excelente mesmo em situações de baixa irradiância.

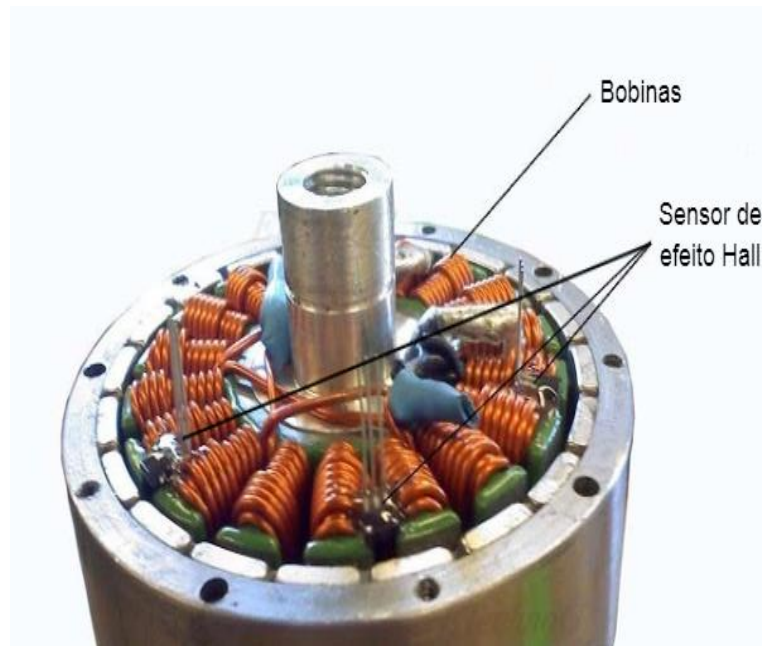
De acordo com [Pinho e Galdino \(2014\)](#), os motores de ímã permanente podem apresentar uma comutação por meio de escovas ou através de circuito eletrônico (sem o uso de escovas). Os motores c.c. com escovas (Figura 2.12) apresentam desgastes mecânicos decorrentes de processos de centelhamento e aquecimento, de forma a demandar manutenção periódica. Além disso, a presença de escovas limita a utilização destes equipamentos em aplicações em que as bombas trabalham submersas ([WENHAM et al., 2007](#)). Nesse sentido, os motores sem escova (Figura 2.13), por utilizarem componentes eletrônicos (como os sensores de efeito Hall), apresentam maior confiabilidade e demandam menos manutenção ([PINHO; GALDINO, 2014](#)).

Figura 2.12 – Vista interna de motor de corrente contínua de ímã permanente com escovas.



Fonte: Adaptado de [Kohnen \(2022\)](#).

Figura 2.13 – Vista interna de motor de corrente contínua de ímã permanente sem escovas.



Fonte: [ETechnoG \(2018\)](#).

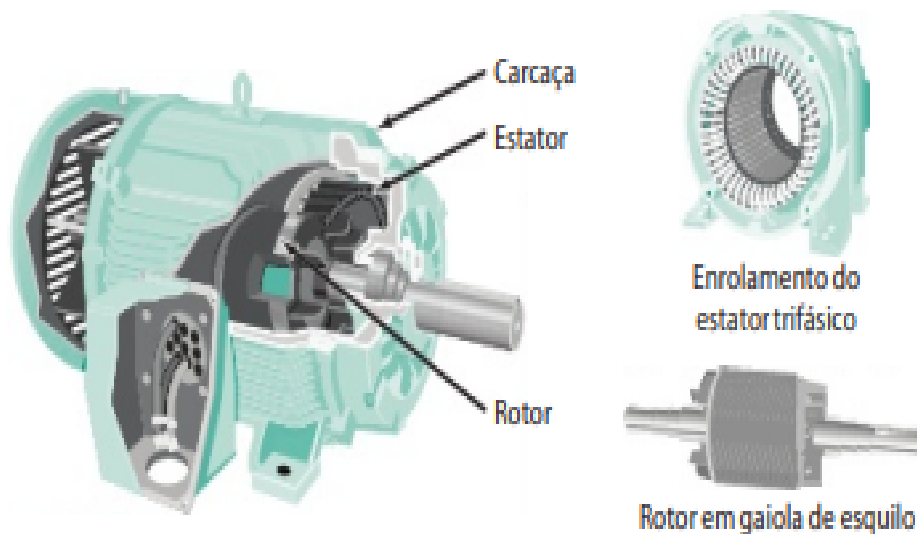
Os motores de corrente contínua apresentam melhor eficiência em relação aos motores de corrente alternada e são compatíveis para acoplamento direto com gerador fotovoltaico, de forma a não necessitar do uso de inversores. Por outro lado, os motores c.c. possuem um custo mais elevado e são comumente disponíveis apenas em potências menores a 10 cv. ([PINHO; GALDINO, 2014](#))

2.2.2.2.2 Motores elétricos de corrente alternada

Os motores elétricos de corrente alternada síncronos são aqueles cuja velocidade de rotação de seu rotor está em sincronismo com o campo girante associado ao enrolamento do estator. Para isso acontecer, é necessário que haja aplicação de uma tensão de corrente contínua no rotor (por meio, por exemplo, de geradores c.c. auxiliares) e de uma tensão de corrente alternada (monofásica ou trifásica) proveniente da rede elétrica ([ELETROBRÁS et al., 2009b](#)).

Por outro lado, os motores elétricos de corrente alternadas assíncronos (ou de indução) giram a uma velocidade menor, mas próxima à frequência da rede de alimentação de corrente alternada, podendo ser monofásicos ou trifásicos. O princípio de funcionamento deste tipo de motor é a aplicação de corrente alternada (proveniente da rede elétrica) no enrolamento do estator, a qual induz grandezas elétricas nas bobinas do rotor. O tipo de rotor mais empregado nos motores de corrente alternada é o gaiola de esquilo (Figura 2.14), em função de sua eficiência, necessidade reduzida de manutenção e baixo custo ([ELETROBRÁS et al., 2009b](#)).

Figura 2.14 – Representação de motor elétrico de corrente alternada do tipo gaiola de esquilo.



Fonte: Petruzella, Júnior e Nascimento (2013).

Segundo Pinho e Galdino (2014), os motores de corrente alternada têm como vantagens sua ampla disponibilidade no mercado e menores preços. Por outro lado, eles são menos eficientes do que os motores de corrente contínua, dada a necessidade do uso de inversores para converter a corrente contínua produzida pelo gerador fotovoltaico em corrente alternada. Alvarenga (2007) afirma que os motores c.a. são os mais utilizados em aplicações cuja potência requerida é maior que 10 cv. No entanto, o uso deste tipo de motor também é corriqueiro em todas as demais faixas de potência.

2.2.3 Dispositivos de condicionamento de potência

De acordo com Morales *et al.* (2016), os dispositivos de condicionamento de potência são equipamentos utilizados para proporcionar um adequado acoplamento entre o gerador fotovoltaico e o conjunto motobomba, possibilitando, por exemplo, a regulação de tensão e corrente fornecido para a motobomba e a conversão de corrente contínua para alternada. Dentre os dispositivos de condicionamento de potência estão os *boosters*, conversores c.c.–c.c., inversores c.c.–c.a. e os conversores de frequência c.c.–c.a., que são explicados nos subtópicos seguintes.

2.2.3.1 Boosters lineares de corrente

Os *boosters* lineares de corrente são equipamentos que reduzem o valor da tensão proveniente do gerador fotovoltaico e, em contrapartida, realizam um incremento da corrente disponível para alimentação do motor elétrico. Dessa forma, as motobombas podem iniciar seu

processo de bombeamento em condições de irradiância menores. Os *boosters* geralmente são empregados em SFB que utilizam motobombas de deslocamento positivo como as helicoidais, visto que esse tipo de configuração demanda uma maior corrente para partida do motor. Por outro lado, as configurações de SFB que utilizam motobombas centrífugas geralmente não necessitam utilizar *boosters*, pois seus motores são capazes de partir mesmo em níveis de baixa irradiância (KIPRONO; LLARIO, 2020).

2.2.3.2 Conversores c.c.-c.c.

Os conversores c.c.-c.c. são dispositivos que regulam a energia em corrente contínua fornecida pelo gerador fotovoltaico a níveis de corrente e tensão c.c. compatíveis aos requisitos de operação do conjunto motobomba. Este tipo de conversor também pode ter sua tensão de entrada ajustada no Ponto de Máxima Potência (MPPT) da curva I-V do gerador fotovoltaico através de circuitos eletrônicos, possibilitando o melhor aproveitamento da radiação incidente em diferentes condições meteorológicas. Nesse caso, este equipamento é denominado conversor c.c.-c.c. com MPPT (MELENDEZ, 2009; MORALES, 2011).

2.2.3.3 Inversores c.c. – c.a.

Os inversores c.c.-c.a. são utilizados para converter a corrente contínua proveniente do gerador fotovoltaico em corrente alternada para alimentar SFB que utilizam motores c.a., como os motores de indução (MELENDEZ, 2009). Esses equipamentos também podem apresentar mecanismos de Seguimento do Ponto de Máxima Potência (MPPT) e saídas monofásica ou trifásica (MORALES, 2011).

De maneira geral, os inversores c.c.-c.a. fornecem tensões e frequências de saída constantes e operam apenas com tensões fixas de entrada. No entanto, em Sistemas Fotovoltaicos de Bombeamento, as grandezas elétricas de saída do dispositivo de condicionamento de potência são de caráter variável. Além disso, em função de o inversor c.c.-c.a. geralmente apresentar tensão de entrada fixa, seu adequado funcionamento requer a utilização de baterias ou conversores c.c.-c.c. (MORALES, 2011).

2.2.3.4 Conversores de frequência

De acordo com Morales *et al.* (2016), os conversores de frequência (Figura 2.15) são equipamentos que realizam o ajuste da velocidade e do torque de motores de indução c.a. a partir do controle da frequência e da tensão que estes equipamentos assíncronos recebem do gerador fotovoltaico. Tais ajustes são realizados a partir de controladores convencionais, como o PID (Proporcional – Integral – Derivativo), e os controladores inteligentes como os de lógica *fuzzy* (RAGHUWANSHI; ARYA, 2021).

Figura 2.15 – Exemplos de conversores de frequência de diferentes potências.



Fonte: WEG (2022).

A utilização destes dispositivos de condicionamento de potência acoplados a Sistemas Fotovoltaicos de Bombeamento permite uma otimização do consumo energético (RAGHUWANSHI; ARYA, 2021), visto que eles realizam o controle da potência consumida pelo motor de indução de acordo com a disponibilidade de potência fornecida pelo gerador fotovoltaico que, por sua vez, varia em função dos níveis de irradiância local (MARANHÃO *et al.*, 2016). Além disso, os conversores de frequência possibilitam a utilização de motobombas convencionais no lugar de modelos exclusivos para uso em sistemas fotovoltaicos, o que expande a quantidade de opções de motobombas que podem ser adquiridas e facilita o acesso a peças de reposição e à mão-de-obra especializada (MORALES *et al.*, 2016).

2.2.4 Sistemas de armazenamento

Segundo Singh e Murshid (2018), os sistemas de armazenamento de energia surgiram da necessidade de aumentar a confiabilidade de Sistemas Fotovoltaicos de Bombeamento, dada a intermitência do recurso solar. Uma das formas de armazenamento é por meio de baterias, que realizam seu processo de carga e descarga em função dos níveis de irradiância, permitindo o fornecimento de água mesmo em períodos nublados e noturnos. No entanto, a utilização de baterias torna o sistema mais complexo, além de exigir manutenções e trocas mais frequentes, aumentando os custos associados. Outra opção existente é o armazenamento de água em tanques. Nesse sentido, quando há irradiância disponível e não há demanda dos usuários, a água bombeada é direcionada para esses reservatórios. Uma vantagem dos tanques é que eles apresentam uma vida útil de décadas (FOSTER; GHASSEMI; COTA, 2009). Por outro lado, a implementação de tanques pode requerer espaços amplos e também elevar os custos do Sistema Fotovoltaico de Bombeamento (SINGH; MURSHID, 2018).

2.3 CONFIGURAÇÕES DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS DE BOMBEAMENTO COM CONVERSORES DE FREQUÊNCIA

Diversas propostas de configurações de Sistemas Fotovoltaicos de Bombeamento que utilizam conversores de frequência como dispositivos de condicionamento de potência para controlar motores elétricos de indução foram desenvolvidas na literatura. O presente tópico explica sucintamente algumas dessas propostas.

2.3.1 Configuração de Brito (2006)

Brito (2006) desenvolveu em sua tese de doutorado uma configuração de Sistemas Fotovoltaicos de Bombeamento utilizando um conversor de frequência de fabricação nacional (CFW08 – Plus do fabricante WEG) para controlar bombas centrífugas e helicoidais. O circuito utilizado para acoplamento do gerador fotovoltaico, motobomba e do dispositivo de condicionamento de potência é composto por disjuntores (tanto no lado c.c, entre gerador e conversor de frequência; como no lado c.a, entre conversor e motobomba), relés de nível e ventilador. Os relés de nível têm como função evitar o chaveamento sucessivo do conversor de frequência em períodos em que os níveis de irradiância não são suficientes para que o sistema esteja operativo.

Nessa configuração proposta, o conversor de frequência trabalha em malha fechada. Inicialmente, o usuário estabelece um *set-point* da variável de processo (no caso presente, a tensão no barramento c.c.) e um circuito divisor de tensão envia um sinal analógico de realimentação para a entrada do dispositivo de condicionamento de potência. Para que a variável de processo seja mantida no *set-point* desejado, utiliza-se um controlador PID, o qual atua, por meio da variação da frequência de operação do conversor, para manter a diferença entre a tensão de *set-point* e a de realimentação próxima a zero. O tipo de controle utilizado é o escalar (BRITO, 2006).

2.3.2 Configuração de Maranhão (2015)

Maranhão (2015) desenvolveu em sua tese de doutorado uma configuração de Sistemas Fotovoltaicos de Bombeamento que utiliza motobombas centrífugas submersas de diferentes potências associadas a dois modelos de conversores de frequência da marca WEG – CFW08 e CFW11, os quais funcionam a partir da lógica *fuzzy*. O sistema de controle é realizado a partir da utilização do microcontrolador Atmega328 da fabricante Atmel, considerado como um Dispositivo para Programação de Controladores (DPC). Este DPC é alimentado pela tensão fornecida pelo gerador fotovoltaico, a qual passa por um circuito divisor de tensão (8-35 V) e pelo circuito regulador de tensão LM7805 de 5 V. Na saída do microcontrolador, uma modulação por largura de pulso (PWM), obtida por um circuito resistor-capacitor (RC), permite transformar o sinal de saída em uma tensão c.c. O DPC apresenta também uma entrada analógica na qual são conectados dois tipos de sensores (*Light Dependent Resistor* – LDR e um módulo fotovoltaico de baixa potência) que monitoram a irradiância, cuja tendência de aumento ou diminuição são

utilizados para realizar a aceleração e desaceleração da motobomba. Na lógica *fuzzy*, o *set-point* da variável de processo (o ponto de máxima potência do gerador fotovoltaico) varia ao longo do dia, em função da irradiância e da temperatura.

2.3.3 Configuração de Santos *et al.* (2020)

Santos *et al.* (2020) desenvolveram uma configuração de Sistemas Fotovoltaicos de Bombeamento composto por uma motobomba centrífuga multiestágios de 0,5 cv controlada pelo conversor de frequência CFW-10 da marca WEG, que utiliza a lógica *fuzzy*. O microcontrolador utilizado no sistema de controle é o controlador de interface periférico (PIC) 18F2550. Nesta configuração, o sistema funciona em malha fechada. A variável – controle é a tensão do barramento c.c., cujo *set-point* fixo corresponde a tensão de máxima potência do gerador fotovoltaico. Tal *set-point* pode ser inserido diretamente no algoritmo que controla o PIC. Um circuito divisor de tensão faz a adequação da tensão fornecida pelo gerador à entrada analógica do microcontrolador (0 – 5 V). Tal tensão é convertida em um sinal digital por meio de um conversor analógico-digital. A partir deste sinal, o algoritmo *fuzzy* realiza o cálculo do erro (diferença entre a tensão lida no microcontrolador e a tensão de *set-point* fixo), determinando, assim, o incremento ou decremento da frequência da modulação por largura de pulso (PWM). O sinal digital PWM é convertido por meio de um filtro RC e enviado para a saída do microcontrolador como sinal analógico, o qual permite o ajuste da velocidade da motobomba.

2.4 DIMENSIONAMENTO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS DE BOMBEAMENTO

O dimensionamento de um Sistema Fotovoltaico de Bombeamento consiste na determinação do “tamanho” de cada um de seus diferentes componentes (gerador fotovoltaico, conjunto motobomba e dispositivos de condicionamento de potência) de forma a garantir o suprimento da demanda hídrica de seus usuários com menores custos possíveis (CHILUNDO; MAHAN-JANE; NEVES, 2018). Dentre os parâmetros que devem ser considerados para a elaboração de um projeto de bombeamento fotovoltaico estão a demanda de água diária dos usuários, a altura manométrica total e a irradiação (MELENDEZ, 2009). A obtenção de cada um desses parâmetros é descrita a seguir.

2.4.1 Variáveis de Projeto

2.4.1.1 Demanda diária de água ($\text{m}^3 \cdot \text{dia}^{-1}$)

De acordo com Pinho e Galdino (2014) e World Bank Group (2018), os Sistemas de Bombeamento Fotovoltaico podem ser utilizados para obtenção de água para diversas aplicações, dentre as quais estão o consumo humano, a dessedentação animal e a irrigação de culturas. O volume de água diário demandado para consumo humano em função da quantidade de pessoas a serem atendidas pelo sistema e do consumo per capita, o qual varia de acordo com o

nível de desenvolvimento socioeconômico de uma dada localidade. A demanda de água para dessedentação animal varia segundo o tipo e o número de cabeças do rebanho. Por outro lado, nas atividades agrícolas, o consumo de água diário depende do clima local, do tipo de solo, das taxas de evapotranspiração da espécie cultivada, dos períodos de safra e da técnica de irrigação empregada. A Tabela 2.1 apresenta as estimativas de consumo de água em seus diferentes usos finais. Para obter a demanda diária, em $\text{m}^3 \cdot \text{dia}^{-1}$, basta-se multiplicar o número de usuários/cabeças/hectares e consumo per capita ou por hectare.

Tabela 2.1 – Estimativa de consumo médio de água para diferentes usos finais em ambiente rural.

Consumo humano¹	Litros.habitante⁻¹.dia⁻¹
Comunidades rurais	70 - 125
Consumo animal¹	Litros. cabeça⁻¹.dia⁻¹
Bovinos/bubalinos	50
Suínos	18,7
Equinos	40
Ovinos/caprinos	10
Galináceos	0,22
Cultivo agrícola	m³.hectare⁻¹.dia⁻¹
Banana ²	50
Feijão ³	44,4
Laranja ⁴	15 - 47
Mandioca ⁵	41,6 – 55,5
Tomate ⁶	33 – 40

Fonte: ANA (2019)¹, Borges e Souza (2021)², Carvalho (2021)³, Magalhães *et al.* (2005)⁴, Mattos, Farias e Filho (2006)⁵, Marouelli e Silva (2002)⁶.

2.4.1.2 Altura manométrica total

Segundo [World Bank Group \(2018\)](#), a altura manométrica, medida em m.c.a. (metros de coluna de água), é um parâmetro de projeto que sinaliza a altura que, em relação ao seu nível normal (como nos lençóis freáticos ou nos rios e lagos), a água deve ser bombeada. Para [Kiprono e Llarío \(2020\)](#), a altura manométrica total (H_{man}) corresponde, no caso de poços, ao somatório da altura dinâmica (H_{dwl}), a altura vertical (H_{elev}), das perdas por fricção (H_f) e das perdas residuais (H_{res}). Ela é dada pela Equação 2.1:

$$H_{man} = H_{dwl} + H_{elev} + H_f + H_{res} \quad (2.1)$$

onde:

H_{dwl} = altura dinâmica, que corresponde à altura entre a superfície do poço e o nível da água após a finalização dos testes de capacidade de bombeamento de poços (m.c.a.).

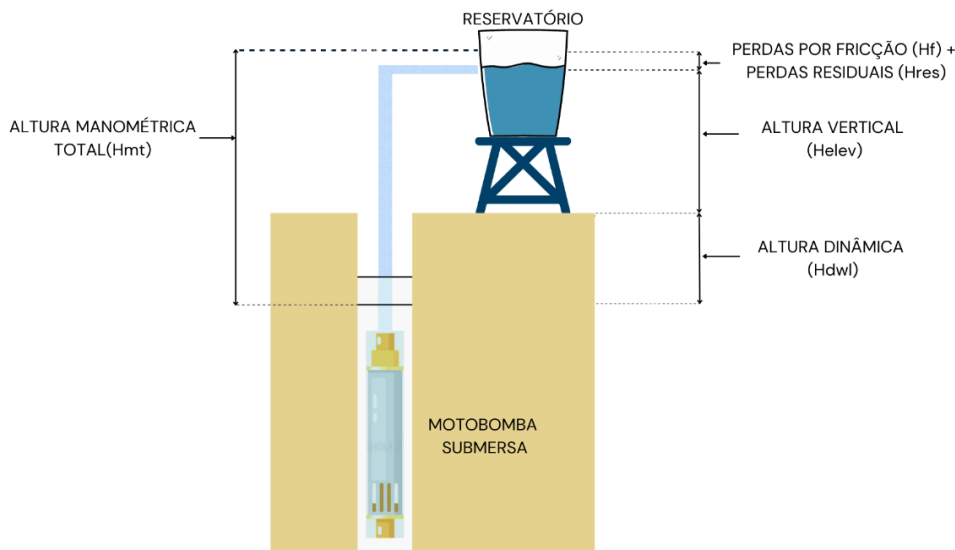
H_{elev} = altura vertical, que corresponde à altura entre a superfície do poço e a entrada do reservatório ou tanque (m.c.a.).

H_f = perdas por fricção, que correspondem a perdas de pressão associadas ao comprimento, diâmetro e à rugosidade da tubulação, além daquelas provenientes da passagem da água em conexões (joelhos, válvulas, registros). As perdas por fricção podem ser calculadas por meio de coeficientes de fricção, os quais podem ser encontrados em tabelas de fricção de tubulações. Geralmente, essas tabelas fornecem a informação das perdas para cada 100 m de tubos (m.c.a.).

H_{res} = perdas residuais, que correspondem à pressão adicional requerida em um determinado ponto de consumo, como o que acontece em aplicações de irrigação (m.c.a.).

A Figura 2.16 apresenta os componentes da altura manométrica total (H_{man}) associados à captação subterrânea.

Figura 2.16 – Esquema das componentes da altura manométrica total para captação subterrânea.



Fonte: Autoria própria (2023).

Ainda de acordo com Kiprono e Llarío (2020), a altura manométrica total (H_{man}), no caso de corpos superficiais (rios e lagos), pode ser dada pelo somatório da altura de sucção ($H_{sucção}$), da altura estática ($H_{estática}$), das perdas por fricção (H_f) e das perdas residuais (H_{res}). Esse somatório é expresso pela Equação 2.2:

$$H_{man} = H_{sucção} + H_{estática} + H_f + H_{res} \quad (2.2)$$

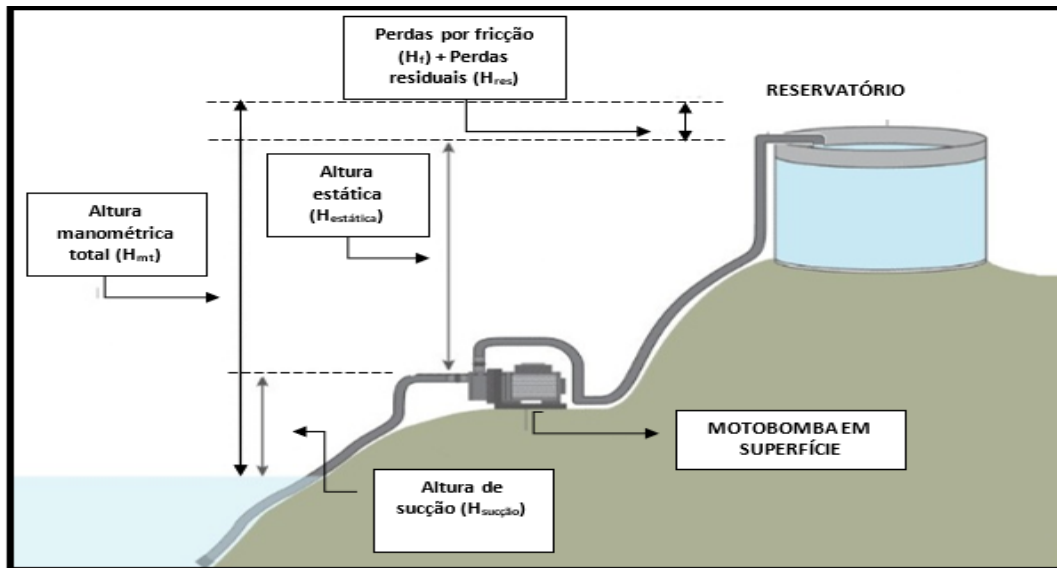
onde:

$H_{\text{sucção}}$ = altura de sucção, que corresponde à altura vertical entre a superfície do corpo hídrico (rio ou lago) e a entrada do conjunto motobomba (m.c.a.).

$H_{\text{estática}}$ = altura estática, que corresponde à altura entre a entrada da motobomba e a entrada do reservatório ou tanque.(m.c.a.).

A Figura 2.17 apresenta os diferentes componentes da altura manométrica total (H_{man}) associadas à captação em corpos hídricos superficiais.

Figura 2.17 – Esquema das componentes da altura manométrica total para captação superficial.



Fonte: Adaptado de [World Bank Group \(2019\)](#).

2.4.1.3 Recurso solar

De acordo com [Kiprono e Llarío \(2020\)](#), o Sol emite radiação na forma de ondas eletromagnéticas. Quando essa radiação atravessa a atmosfera terrestre, parte dela pode sofrer processos de espalhamento, reflexão e absorção por moléculas presentes no ar e o restante incide sobre um dado coletor no plano horizontal ou inclinado situado na superfície terrestre, formando a radiação global. Esta radiação global é formada pelas componentes direta, difusa e refletida. Nos dias ensolarados, há um predomínio da radiação direta; por outro lado, nos períodos nublados, são observados maiores valores de radiação difusa.

A irradiância, dada comumente em $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$, corresponde à potência instantânea proveniente da radiação eletromagnética do Sol incidente em uma dada superfície. Este parâmetro é variável ao longo do dia, de forma que os menores valores de irradiância tendem a ser observados durante o nascer e o pôr do Sol e os maiores, durante o meio-dia solar. Durante o meio-dia solar de um dia de céu limpo, um valor típico de irradiância incidente numa superfície inclinada na região do Equador é $1000 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ ([KIPRONO; LLARIO, 2020](#)).

A irradiação, dada em $\text{kWh}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{dia}^{-1}$, corresponde à quantidade de irradiância inci-

dente sobre uma dada superfície ao longo de um período, geralmente um dia. A irradiação pode ser expressa também na forma de Horas de Sol Pleno (HSP), que equivale ao número de horas por dia em que se observaria uma irradiância de 1000 W.m^{-2} . Por exemplo, se a irradiação de um determinado local fosse de $5000 \text{ Wh.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$, o valor de HSP seria igual a 5 (KIPRONO; LLARIO, 2020).

A irradiação considerada para o dimensionamento de Sistemas Fotovoltaicos de Bombeamento é a irradiação global no ângulo de inclinação ótimo do gerador fotovoltaico. Para o território brasileiro, os dados solarimétricos podem ser obtidos a partir de *softwares* e plataformas nacionais como o programa Potencial Solar - *SunData* v 3.0 do Centro de Referência para as Energias Solar e Eólica Sérgio de S. Brito (CRESESB) e a base de dados do Atlas Brasileiro de Energia Solar – 2ª edição do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE).

O programa *Sun Data* é acessado na *Web* e, nele, o usuário, a partir do fornecimento das coordenadas geográficas (latitude e longitude) do local de interesse, consegue obter dados de irradiação global diária média mensal tanto no plano horizontal como também em três inclinações distintas (ângulo igual a latitude, ângulo que proporciona a maior média anual e ângulo que possibilita a obtenção do maior mínimo mensal) para três localidades próximas àquela em estudo. A fonte dos dados de irradiação global no plano horizontal, que são convertidos para planos inclinados por meio do método isotrópico de Liu e Jordan estendido por Klein, é o Atlas Brasileiro de Energia Solar – 2ª edição do INPE.

O Atlas Brasileiro de Energia Solar – 2ª edição, desenvolvido por Pereira *et al.* (2017), é uma plataforma que contém as médias diárias mensais e anuais de irradiação global horizontal, global no plano inclinado a mesma latitude da localidade, difusa, direta normal e a radiação fotossinteticamente ativa (PAR). Esses dados de radiação foram produzidos a partir de uma modelagem numérica de medições de imagens de satélite ao longo de 17 anos (1999-2015) em mais de 72 mil pontos do território brasileiro. Cada um desses pontos abrangem uma área de aproximadamente 10 km x 10 km, sendo identificados por meio de um código identificador, ou código ID. O usuário pode tanto realizar uma consulta online a base de dados como baixar as informações disponíveis em três formatos - CSV (planilha eletrônica *Excel*®), SHP (*Shapefile*) para leitura em *softwares* de Sistemas de Informações Geográficas (SIG) e QGS para utilização dentro do programa QGIS. Na busca online, o usuário deve selecionar, no mapa, o estado em que se situa a localidade em estudo e identificar o código ID que a abranja. Posteriormente, é necessário escolher o tipo de irradiação que se deseja obter e, na tabela que surge, inserir o ID no campo de busca. Dessa forma, os dados de irradiação relativos àquele local serão exibidos.

2.4.2 Equações básicas para Dimensionamento de Sistemas Fotovoltaicos de Bombeamento

Nos projetos de dimensionamento de Sistemas Fotovoltaicos de Bombeamento, algumas variáveis importantes precisam ser determinadas. Dentre esses parâmetros, tem-se a potência

hidráulica (P_H) requerida pela motobomba para bombear uma dada vazão de projeto até uma determinada altura manométrica total. Esse parâmetro pode ser calculado a partir da Equação 2.3:

$$P_H = 2,725 * Q * H_{man} \quad (2.3)$$

onde:

P_H – Potência hidráulica requerida pelo conjunto motobomba (W).

Q – Vazão de projeto ($m^3 \cdot h^{-1}$).

H_{man} – Altura manométrica total (m.c.a.).

O valor de 2,725 representa a constante hidráulica (C_H), que pode ser calculada a partir da Equação 2.4:

$$C_H = \frac{\rho * g}{3600} \quad (2.4)$$

onde:

ρ - densidade da água ($kg \cdot m^{-3}$) = 1000 $kg \cdot m^{-3}$.

g – aceleração devido à gravidade ($m \cdot s^{-2}$) = 9,81 $m \cdot s^{-2}$.

3600 – corresponde ao número de segundos por hora.

A vazão de projeto (Q), um dos parâmetros essenciais para seleção adequada do conjunto motobomba, pode ser determinada a partir da relação entre a demanda hídrica diária do usuário e o tempo de operação do Sistema Fotovoltaico de Bombeamento, conforme expresso na Equação 2.5. No presente estudo, tal período de operação equivale às Horas de Sol Pleno (HSP), variável esta que corresponde ao número equivalente de horas por dia com uma irradiância de 1000 $W \cdot m^{-2}$. O cálculo do HSP está expresso na Equação 2.6.

$$Q = \frac{V_D}{HSP} \quad (2.5)$$

$$HSP = \frac{G_T}{G_{REF}} \quad (2.6)$$

onde:

V_D – Volume diário demandado ($m^3 \cdot dia^{-1}$).

HSP – Horas de Sol Pleno ($h \cdot dia^{-1}$).

G_T – Irradiação global diária no plano do gerador fotovoltaico ($kWh \cdot m^{-2} \cdot dia^{-1}$).

G_{REF} – Irradiância nas Condições Padrão de Teste (STC) - 1000 $W \cdot m^{-2}$.

A potência elétrica (P_{EL}) no eixo do conjunto motobomba necessária para elevação de uma dada vazão de projeto a uma altura manométrica pode ser calculada a partir da Equação 2.7:

$$P_{EL} = \frac{P_H}{\eta_{MB} * \eta_{CP}} = \frac{2,725 * Q * H_{man}}{\eta_{MB} * \eta_{CP}} \quad (2.7)$$

onde:

P_{EL} – Potência elétrica nos enrolamentos do motor (W).

η_{MB} – Eficiência do conjunto motobomba elétrico (%).

η_{CP} - Eficiência do dispositivo de condicionamento de potência (%), valor este que, para conversores de frequência, pode ser assumida como 0,95, de acordo com [Abella, Lorenzo e Chenlo \(2003\)](#).

Nesse sentido, a energia elétrica demandada pela motobomba (E_{EL}) para realizar o bombeamento de água é dada pela Equação 2.8 ou, alternativamente, pela Equação 2.9:

$$E_{EL} = P_{EL} * T = P_{EL} * HSP \quad (2.8)$$

$$E_{EL} = \frac{2,725 * V_D * H_{man}}{\eta_{MB} * \eta_{CP}} \quad (2.9)$$

onde:

E_{EL} – Energia elétrica demandada diariamente pela motobomba (Wh.dia⁻¹).

T – Tempo de operação da motobomba (h.dia⁻¹), que, no caso do bombeamento fotovoltaico, corresponde ao parâmetro HSP.

A potência nominal do gerador fotovoltaico (P_{GFV}), em W_p , necessária para o processo de bombeamento pode ser calculada a partir da Equação 2.10:

$$P_{GFV} = 1,25 * \frac{E_{EL}}{HSP} \quad (2.10)$$

O valor de 1,25 corresponde a um fator de segurança médio necessário para garantir que o gerador fotovoltaico forneça potência suficiente para atender os requisitos elétricos do conjunto motobomba mesmo diante da ocorrência de perdas associadas aos módulos fotovoltaicos (como a temperatura de operação das células fotovoltaicas, degradação induzida pela exposição à luz, baixa eficiência em menores níveis de irradiância), às condições ambientais locais (como a presença de poeira e sombreamento) e aos demais componentes do SFB (como quedas de tensão nas fiações elétricas e erros no sistema de Seguimento do Ponto de Máxima Potência) ([KIPRONO; LLARIO, 2020](#)).

2.4.3 Softwares para Dimensionamento de Sistemas Fotovoltaicos de Bombeamento

De acordo com [Pinho e Galdino \(2014\)](#), existem, no mercado, diferentes ferramentas computacionais para auxiliar na elaboração de projetos de energia solar, os quais incluem também os Sistemas Fotovoltaicos de Bombeamento. Tais *softwares* podem ser utilizados para ava-

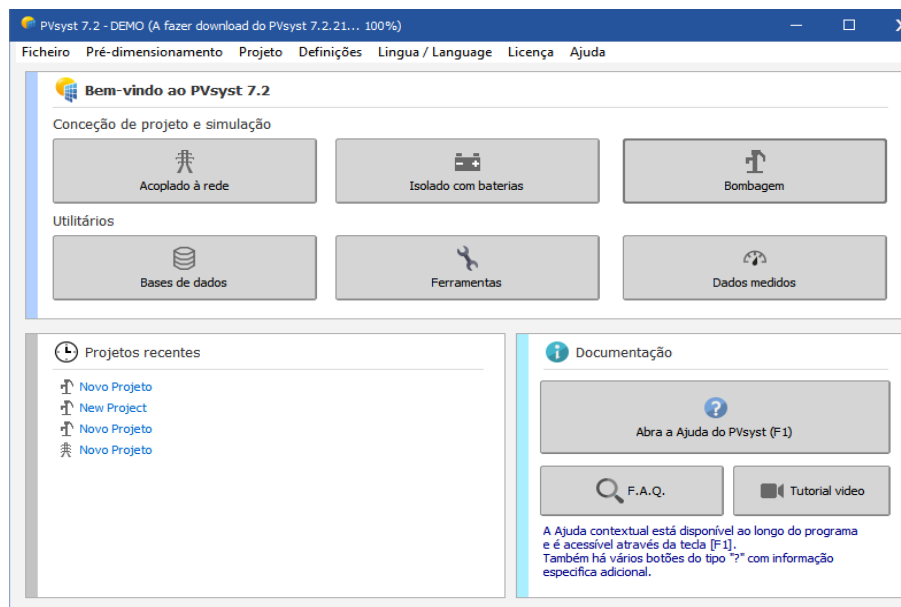
liar diversos aspectos associados à implementação desta tecnologia, como a análise de viabilidade técnica e econômica, dimensionamento, simulação da operação e acesso a base de dados climáticos e meteorológicos.

Dentre as diversas ferramentas computacionais utilizadas para projetos de bombeamento fotovoltaico estão o *PVSyst*, *SISIFO*, *HOMER* e o *RETScreen*. No entanto, aqui será melhor descrito apenas o *software PVSyst*, visto que ele tem o maior enfoque no processo de dimensionamento dos componentes do sistema, tema do presente estudo.

2.4.3.1 PVSyst

O *PVSyst* (PVSYST, 2021) é um *software* computacional pertencente a empresa suíça *PVSyst SA*, situada em Genebra. Atualmente, a versão em operação é a *PVSyst 7.2*, conforme Figura 2.18. Ele é uma ferramenta que possibilita a avaliação, o dimensionamento e a simulação da operação de Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede (SFCR), Sistemas Fotovoltaicos Isolados (SFI) e Sistemas Fotovoltaicos de Bombeamento (SFB). Em relação aos Sistemas Fotovoltaicos de Bombeamento, o *PVSyst* permite a realização de dois tipos de projeto: um pré-dimensionamento e um dimensionamento completo.

Figura 2.18 – Tela principal do *software PVSyst* versão 7.2.



Fonte: PVSyst (2021).

No caso do pré-dimensionamento, a ferramenta apresenta três seções para entrada de dados (“Localização e Meteorologia”; “Horizonte” e “Sistema”) e uma seção com os resultados após realização da simulação da operação do Sistema Fotovoltaico de Bombeamento em estudo. Na seção “Localização e Meteorologia” o usuário pode, inicialmente, selecionar uma determinada localidade (dentre as poucas opções existentes) para realização do projeto, para a qual, por

meio de bases de dados presentes no próprio *PVSyst*, são obtidos automaticamente seus dados geográficos (latitude, longitude, altitude) e climatológicos (irradiação global horizontal, irradiação difusa horizontal, temperatura média, velocidade do vento e umidade relativa), a partir da bases de dados *Meteororm*.

Já na seção “Horizonte”, é possível o usuário traçar a linha do horizonte (por meio de pares de pontos azimute – altura) para simular o sombreamento causado por objetos distantes, como montanhas. Este traçado pode ser feito manualmente ou automaticamente pela importação de arquivos (do próprio *PVSyst* ou de planilhas *Excel*®) ou de fontes *Web*. Já na seção “Sistema”, o usuário insere os dados de demanda hídrica (que pode ser média diária anual, sazonal ou mensal), altura manométrica (constante ao longo do ano), tipo e tecnologia das bombas e conversores de potência, comprimento e diâmetro de tubulações, bem como a orientação do plano dos módulos (azimute e ângulo de inclinação). É possível ainda utilizar uma ferramenta de otimização da orientação, a fim de indicar a angulação ótima para maximização da irradiação no plano do gerador.

Por fim, na seção de “Resultados”, o programa calcula e apresenta a potência necessária da bomba e do gerador fotovoltaico e o volume do reservatório, considerando os dados de entrada e parâmetros de otimização (número de dias de autonomia e Probabilidade de Perda de Carga - LOLP). Além disso, ele computa a energia fotovoltaica gerada ($\text{kWh}\cdot\text{dia}^{-1}$) e o volume de água bombeado diário ($\text{m}^3\cdot\text{dia}^{-1}$) para cada um dos meses do ano e faz uma análise de custos básica.

No caso do dimensionamento completo, o *PVSyst* apresenta duas divisões principais: “Projeto” e “Nova Variante do Sistema”. Na seção “Projeto”, é possível selecionar uma determinada localidade de estudo no Mapa Interativo e, para esta, importar dados geográficos e meteorológicos a partir de diferentes bases de dados (*Meteororm*, *PVGIS*, *NREL*, *Solcast*, *Solar Anywhere*). Esses dados meteorológicos estão disponíveis para qualquer localidade do globo e são calculados através de séries temporais sintéticas ou a partir do Ano Meteorológico Típico.

Por outro lado, a seção “Nova Variante do Sistema” possui duas áreas principais: “Parâmetros Principais” e “Opcionais”. Dentro dos “Parâmetros Principais”, tem-se as subáreas “Orientação”, “Exigências de água”, “Sistema” e “Perdas Detalhadas”. Em “Orientação”, é possível selecionar diferentes orientações relativas ao gerador fotovoltaico (inclinação fixa, ajuste sazonal, seguimento solar de um ou dois eixos).

Já em “Exigências de água”, o usuário pode escolher o tipo de sistema de bombeamento utilizado (poço ou lago/rio para reservatório) e inserir diversos parâmetros relativos ao circuito hidráulico de bombeamento para captação subterrânea (como nível estático, rebaixamento específico do poço e nível de aspiração/entrada da bomba) e superficial (como nível da água em relação ao solo). Além disso, o projetista pode definir os dados de demanda hídrica e de altura

manométrica. É possível considerar também, caso necessário, variações sazonais e mensais no nível estático do poço. Características das tubulações (material, comprimento) também são utilizadas no projeto.

Com todos esses dados de entrada, o *software* realiza o pré-dimensionamento do Sistema Fotovoltaico de Bombeamento, calculando o volume médio diário anual bombeado, a energia hidráulica e elétrica requeridas pelo sistema ao longo do ano, do tamanho do reservatório (em função do número de dias de autonomia) e também a potência requerida da motobomba e do gerador fotovoltaico.

Na subárea “Sistema”, é possibilitado ao usuário escolher, dentre uma ampla gama de opções de motobombas (de diferentes tipos, tecnologias, potências e fabricantes), uma daquelas que seja compatível com suas necessidades, as quais são recomendadas pelo próprio *software*. Ao selecionar um dado modelo de motobomba, o programa calcula e recomenda a quantidade de equipamentos em série e em paralelo necessários para atender os requerimentos (altura manométrica, vazão e rebaixamento específico) do sistema de bombeamento. O *software* também apresenta as curvas de capacidade (Vazão em função da Potência; Vazão em função da Tensão) das motobombas contidas em seu banco de dados, permitindo também inclusão de novas curvas e remoção das já existentes.

Na mesma subárea “Sistema”, é possível inserir, como critério de dimensionamento, a potência do gerador fotovoltaico estimada previamente e selecionar diferentes modelos de módulos fotovoltaicos presente na base de dados do *PVSyst* para implementação do sistema de bombeamento. Após tal seleção, o *software* calcula a quantidade necessária de módulos (em série e em paralelo) de um dado modelo para suprimento dos requerimentos do bombeamento. Para cada módulo do banco de dados, é possível verificar/configurar suas especificações elétricas e, a partir destas, obter suas curvas características (Corrente em função da Tensão, Potência em função da Tensão). Por fim, o usuário pode selecionar o tipo e o modelo do dispositivo de condicionamento de potência que será utilizado no projeto dentre as diversas opções existentes no programa, verificar os dados elétricos deste equipamento e obter/alterar suas curvas de Eficiência em função da Potência.

Na subárea “Perdas Detalhadas”, o usuário pode inserir dados de entrada para o cálculo de diferentes tipos de perdas associadas aos Sistemas Fotovoltaicos de Bombeamento, sejam elas térmicas, ôhmicas, por sujidade, envelhecimento (degradação) e também aquelas relativas ao ângulo de incidência solar e ao *mismatch* entre células e módulos fotovoltaicos

Dentro da área “Opcional”, além da subárea “Horizonte” que permite, assim como no modo de pré-dimensionamento, a simulação de sombras distantes, tem-se também a subárea “Sombras Próximas”. Esta possui uma ferramenta de desenho de objetos 3D para simular a presença de edifícios e outras construções que podem estar nas proximidades do gerador fotovoltaico e gerar sombreamento que interfira na geração energética. O efeito do sombreamento

pode ser verificado na ferramenta de simulação da operação do Sistema Fotovoltaico de Bombeamento presente no *PVSyst*.

Após o processamento de todos os dados de entrada e escolha de equipamentos, o projetista pode executar a simulação da operação, a partir da qual será demonstrado se o sistema de bombeamento proposto atende ou não as exigências hídricas do projeto a partir do cômputo mensal e anual do volume de água bombeado.

O programa pode ser obtido a partir de seu próprio *website* e está disponível para utilização gratuita durante 30 dias com todas as suas funcionalidades. Posteriormente, para permanecer com acesso a todas essas ferramentas, é necessário comprar sua licença.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A pesquisa é de caráter aplicado, pois visa responder uma problemática comumente enfrentada durante a concepção de projetos de bombeamento solar fotovoltaico: o adequado dimensionamento dos sistemas propostos, de forma a garantir o atendimento a demanda hídrica dos usuários.

O procedimento técnico do estudo baseia-se em uma pesquisa experimental, a qual contém um objeto de estudo (volume de água bombeado ao longo de um ciclo), um conjunto de variáveis independentes que exercem influência direta sobre a variável dependente (objeto de estudo) e mecanismos de monitoramento e controle sobre as variáveis do sistema (GIL, 2002). Nesse sentido, a pesquisa foi desenvolvida a partir da realização de ensaios para determinação da capacidade de produção diária de água de motobombas em bancada de ensaio de Sistemas Fotovoltaicos de Bombeamento (SFB).

Os tópicos a seguir descrevem as áreas de estudo, as características básicas das configurações dos SFB avaliados e de seus componentes (gerador fotovoltaico, conjunto motobomba, conversor de frequência) e os equipamentos utilizados para realização de etapas experimentais (traçador de curva I-V e fonte de tensão estabilizada). Informações sobre a bancada de ensaio e seu funcionamento e sobre as características dos instrumentos de medição (módulos de referência, célula calibrada, hidrômetros, resistores *shunt*, transdutores de tensão, transdutores de pressão e piranômetros) e dos sistemas de aquisição de dados (*dataloggers*) também são detalhadas. Na sequência, as etapas relacionadas à realização dos ensaios de caracterização de geradores fotovoltaicos e motobombas são elencadas em ordem lógica e o procedimento metodológico destes testes é detalhado. Por fim, é enunciada e descrita a hipótese de pesquisa, bem como a forma de análise de dados.

3.1 ÁREA DE ESTUDO

Os ensaios de caracterização de Sistemas Fotovoltaicos de Bombeamento foram realizados em duas universidades: Universidade de São Paulo (USP) e Universidade Federal do Amapá (UNIFAP). Na USP, o estudo foi desenvolvido na área externa do Laboratório de Sistemas Fotovoltaicos – LSF (Figura 3.1), localizado nas coordenadas geográficas $-23,559067^\circ$ S e $-46,735059^\circ$ W. Na UNIFAP, o estudo foi desenvolvido no terraço do bloco da Engenharia Elétrica (Figura 3.2), localizado nas coordenadas geográficas -0.002940° S, -51.083966° W.

Figura 3.1 – Vista aérea da área externa do Laboratório de Sistemas Fotovoltaicos (LSF).



Fonte: Autoria própria (2023).

Figura 3.2 – Vista aérea do terraço do bloco da Coordenação do Curso de Engenharia Elétrica da UNIFAP.



Fonte: Google Maps.

A escolha de ambas as universidades para o desenvolvimento da pesquisa está associada ao fato de que estas instituições apresentam infraestruturas laboratoriais similares para a realização de pesquisas na área de bombeamento fotovoltaico e também ao programa de cooperação existente entre USP e UNIFAP, possibilitando uma divisão de tarefas.

3.2 CONFIGURAÇÕES DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS DE BOMBEAMENTO ESTUDADOS

Os sistemas fotovoltaicos de bombeamento avaliados no estudo são compostos por gerador fotovoltaico de silício cristalino, motor de indução trifásico, bombas centrífugas multietágios e conversores de frequência como dispositivos de condicionamento de potência. Foram

testadas nove configurações de sistemas fotovoltaicos de bombeamento, conforme descritas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Características dos sistemas fotovoltaicos de bombeamento avaliados.

Configuração	Gerador fotovoltaico	Condicionador de potência	Motobomba	Tipo de testes realizados
1	<i>Yingli Solar</i> , modelo YL055P -17b 2/5 de 1045 W_p	Conversor de frequência WEG modelo CFW500 <i>Solar Drive</i> (2 cv)	Schneider SUB15 -05NY4E4 (0,5 cv - 4 estágios)	Fonte c.c. Sol real
2	<i>Komaes</i> , modelo KM (P) 85 de 1530 W_p		Schneider SUB25-10NY4E6 (1 cv - 6 estágios)	
3	<i>Isofotón</i> , modelo ISF-60/12 de 2400 W_p		Schneider SUB40-15S4E6 (1,5 cv - 6 estágios)	
4	<i>Isofotón</i> , modelo ISF-60/12 de 3600 W_p		Schneider SUB40-20S4E8 (2 cv - 8 estágios)	
5	<i>Yingli Solar</i> , modelo YL055P -17b 2/5 de 1045 W_p		Leão 4R4PA-06 230 (0,5 cv - 6 estágios)	
6	<i>Komaes</i> , modelo KM (P) 85 de 1530 W_p		Leão 4R6PB-06 230 (1 cv - 6 estágios)	
7	<i>Isofotón</i> , modelo ISF-60/12 de 2400 W_p		Leão 4R6PB-07 370 (1,5 cv - 7 estágios)	
8	<i>Isofotón</i> , modelo ISF-60/12 de 3600 W_p		Leão 4R6PB-09 370 (2 cv - 9 estágios)	
9	-		Leão 4R4PA-05 230 (0,5 cv - 5 estágios)	Fonte c.c.

Fonte: Autoria própria (2023).

A caracterização do desempenho operacional das motobombas foi realizada a partir de dois tipos de ensaios: os testes com a fonte de tensão estabilizada em corrente contínua e os testes a sol real. Para as configurações 2, 3, 4, 6, 7 e 8, os testes com fonte c.c. foram realizados no LSF – USP; para as configurações 1 e 5, tais ensaios foram desenvolvidos na UNIFAP e para a configuração 9 (que contém a motobomba padrão de testes), os ensaios com a fonte c.c.

ocorreram em ambas as universidades. Por outro lado, os experimentos a sol real dos sistemas fotovoltaicos de bombeamento foram desenvolvidos na UNIFAP, para as motobombas de 0,5 cv e 1 cv, e na USP, para os equipamentos de 1,5 cv e 2 cv.

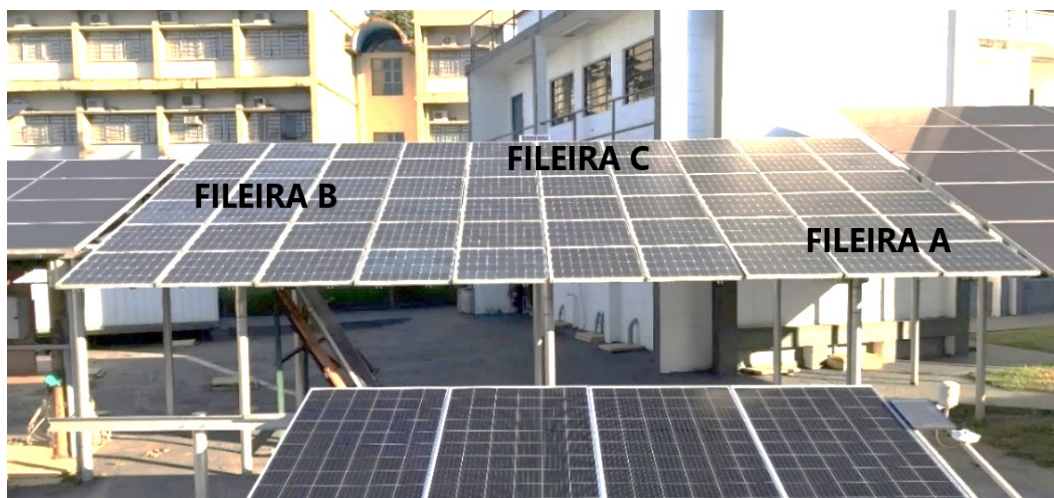
Os testes com fonte c.c. para motobombas com potência maior ou igual a 1 cv foram realizados na USP, visto que tais equipamentos, para operarem à frequência nominal, requerem uma potência elétrica maior do que a fornecida pela fonte c.c de 1200 W da UNIFAP. Além disso, foi selecionada uma motobomba de 0,5 cv para ser utilizada como padrão de testes, pois ambos os laboratórios possuem infraestrutura compatível para caracterização de motobombas dessa faixa de potência.

3.3 CARACTERIZAÇÃO DOS COMPONENTES DOS SISTEMAS FOTOVOLTAICOS DE BOMBEAMENTO

3.3.1 Gerador fotovoltaico

O gerador fotovoltaico utilizado nos ensaios a sol real no LSF-USP é composto por 60 módulos fotovoltaicos da *Isofotón* (modelo ISF – 60/12), cada um com uma potência nominal de placa de 60 W_p . O gerador é subdividido em três fileiras (A+B+C), conforme indicado na Figura 3.3. Cada fileira contém 20 módulos, totalizando uma potência nominal de 1200 W_p . Os testes a sol para motobombas de 1,5 cv foram feitos utilizando duas fileiras (A+B) com um total de 2400 W_p ; já em casos de testes de motobombas de 2 cv, foram utilizadas as três fileiras, que equivalem a 3600 W_p .

Figura 3.3 – Gerador fotovoltaico da *Isofotón* utilizado nos ensaios de motobombas de 1,5 cv e 2 cv na USP.



Fonte: Autoria própria (2023).

Na UNIFAP, os ensaios de caracterização a sol real de motobombas de 0,5 cv foram feitos com um gerador fotovoltaico composto por 19 módulos em série da *Yingli Solar* (modelo

YL055P- 17b 2/5), cada qual com uma potência nominal de placa de $55 W_p$, totalizando $1045 W_p$. Já os testes a sol com as motobombas de 1 cv foram realizados com um gerador fotovoltaico formado por 18 módulos em série da *Komaes* (modelo KM(P)85), cada qual com uma potência de $85 W_p$, o que totaliza $1530 W_p$. A Figura 3.4 apresenta o gerador com módulos fotovoltaicos da *Yingli*, enquanto a Figura 3.5, o gerador com módulos fotovoltaicos da *Komaes*.

Figura 3.4 – Gerador fotovoltaico com módulos fotovoltaicos da *Yingli Solar* utilizado nos ensaios de motobombas de 0,5 cv na UNIFAP.



Fonte: A autoria própria (2023).

Figura 3.5 – Gerador fotovoltaico da *Komaes* utilizado nos ensaios de motobombas de 1 cv na UNIFAP.



Fonte: A autoria própria (2023).

As principais características técnicas de catálogo dos módulos fotovoltaicos utilizados estão resumidas na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Características técnicas dos módulos fotovoltaicos utilizados nos experimentos.

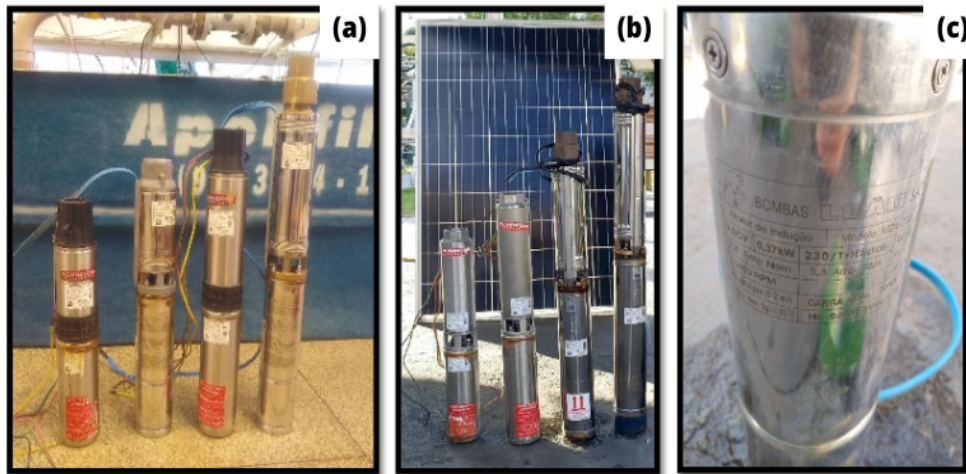
	Módulos fotovoltaicos utilizados nos ensaios		
Características	ISF – 60/12¹	YL055P- 17b 2/5²	KM(P)85³
Tecnologia	Silício monocristalino	Silício policristalino	Silício policristalino
Número de células em série	36	36	36
Área do módulo	0,514 m ²	0,416 m ²	0,639 m ²
Ponto de potência máxima (P_{mp})	60 W _p	55 W _p	85 W _p
Tensão de máxima potência (V_{mp})	17,3 V	17,83 V	18,1 V
Corrente de máxima potência (I_{mp})	3,47 A	3,08 A	4,7 A
Tensão de circuito aberto (V_{oc})	21,6 V	22,07 V	21,63 V
Corrente de curto-circuito (I_{sc})	3,73 A	3,28 A	5,1 A

Fonte: Folha de dados da Isofotón (2016)¹, Yingli Solar (2013)² e Komaes (2022)³.

3.3.2 Conjunto Motobomba

No estudo, foram avaliados nove (9) motobombas centrífugas submersíveis multiestágios trifásicas de quatro faixas de potência (0,5 cv; 1 cv; 1,5 cv e 2 cv) e de dois fabricantes nacionais (Schneider e Leão). O critério de seleção destas motobombas está relacionado a sua ampla disponibilidade no mercado brasileiro e à compatibilidade de suas características (altura manométrica, potência e vazão) com os requerimentos comumente observados em projetos desenvolvidos no país. A Figura 3.6 (a) ilustra as motobombas de 0,5 cv e 1 cv testadas apenas na UNIFAP; a Figura 3.6 (b) ilustra as motobombas de 1,5 cv e 2 cv ensaiadas apenas na USP e a Figura 3.6 (c) apresenta a motobomba de padrão de teste de 0,5 cv testada em ambas universidades.

Figura 3.6 – Motobombas centrífugas submersíveis empregadas no estudo: (a) motobomba de 0,5 cv e 1 cv – UNIFAP; (b) motobombas de 1,5 cv e 2 cv – USP; (c) motobomba padrão de teste – USP/UNIFAP.



Fonte: Autoria própria (2023).

A Tabela 3.3 apresenta algumas características básicas das motobombas caracterizadas nos ensaios de desempenho operacional.

Tabela 3.3 – Características técnicas das motobombas utilizadas nos experimentos.

Configuração	Motobomba	Número de estágios	Tensão de operação do motor (V)	Corrente nominal do motor (A)
1	Schneider SUB15-05NY4E4 (0,5 cv)	4	230	2,4
2	Schneider SUB25-10NY4E6 (1 cv)	6		3,9
3	Schneider SUB40-15S4E6 (1,5 cv)	6		5,0
4	Schneider SUB40-20S4E8 (2 cv)	8		6,7
5	Leão 4R4PA-06 230 (0,5 cv)	6	220	2,8
6	Leão 4R6PB-06 230 (1 cv)	6		4,5
7	Leão 4R6PB-07 370 (1,5 cv)	7		7,3
8	Leão 4R6PB-09 370 (2 cv)	9		8,3
9	Leão 4R4PA-05 230 (0,5 cv)	5	230	2,8

Fonte: Dados de placa das motobombas.

As características de operação de cada uma das motobombas podem ser consultadas nos catálogos disponibilizados pelos fabricantes e estão descritas nas Tabelas 3.4 a 3.12 a seguir.

Tabela 3.4 – Motobomba Schneider, modelo SUB15-05NY4E4, 4 estágios, de 0,5 cv.

SCHNEIDER SUB15-05NY4E4, 0,5 cv										
Altura manométrica (m.c.a.)	52	49	47	45	43	39	35	30	24	18
Vazão (m ³ .h ⁻¹)	0	0,8	1,2	1,6	2	2,5	3	3,5	4	4,5
Potência hidráulica (W) ¹	0	107	154	196	234	266	286	286	262	221
Eficiência Motobomba (%) ²³	0,0	14,0	20,1	25,7	30,6	34,7	37,4	37,4	34,2	28,9

Fonte: Elaboração própria a partir de dados de Schneider (2022b).

Tabela 3.5 – Motobomba Schneider, modelo SUB25-10NY4E6, 6 estágios, de 1 cv.

SCHNEIDER SUB25-10NY4E6, 1 cv														
Altura manométrica (m.c.a.)	69	67	66	64	62	59	56	52	48	43	38	32	27	21
Vazão (m ³ .h ⁻¹)	0	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6	6,5	7	7,5	8
Potência hidráulica (W)	0	365	450	523	591	643	687	709	719	703	673	610	552	458
Eficiência Motobomba (%)	0,0	29,4	36,2	42,1	47,6	51,7	55,2	57,0	57,9	56,6	54,2	49,1	44,4	36,8

Fonte: Elaboração própria a partir de dados de Schneider (2022b).

¹ A potência hidráulica da bomba para cada ponto da curva Vazão em função da Altura Manométrica ($Q-H_{man}$) foi determinada a partir da Equação 2.3 (página 53).

² A eficiência da motobomba foi calculada a partir da razão entre a potência hidráulica da bomba e a potência elétrica do motor c.a.. A potência elétrica do motor c.a. (P_{ca}) foi determinada pela seguinte equação:

$$P_{ca} = \sqrt{3} * V * I * \cos \phi \quad (3.1)$$

onde: V – Tensão de operação do motor (V) ; I – Corrente nominal (A); $\cos \phi$ – Fator de potência – 0,8 (assumido).

³ Em Sistemas Fotovoltaicos de Bombeamento, o fator de potência é variável. Por esse motivo, em futuros estudos, recomenda-se fazer os cálculos da eficiência levando em conta as curvas de rendimento da bomba dadas pelo fabricante e do rendimento típico de um motor. Para o presente estudo, não havia disponível no catálogo do fabricante Leão as curvas das bombas que foram aqui testadas.

Tabela 3.6 – Motobomba Schneider, modelo SUB40-15S4E6, 6 estágios, de 1,5 cv.

SCHNEIDER SUB40-15S4E6, 1,5 cv																		
Altura manométrica (m.c.a.)	51	49	48	48	47	46	45	44	43	41	39	37	35	32	30	27	24	18
Vazão ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	0	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6	6,5	7	7,5	8	8,5	9	9,5	10	11
Potência hidráulica (W)	0	334	392	458	512	564	613	659	703	726	744	756	763	741	736	699	654	540
Eficiência Motobomba (%)	0,0	20,9	24,6	28,7	32,1	35,4	38,5	41,4	44,1	45,6	46,7	47,5	47,9	46,5	46,2	43,9	41,0	33,9

Fonte: Elaboração própria a partir de dados de [Schneider \(2022b\)](#).

Tabela 3.7 – Motobomba Schneider, modelo SUB40-20S4E8, 8 estágios, de 2 cv.

SCHNEIDER SUB40-20S4E8, 2 cv																		
Altura manométrica (m.c.a.)	68	65	65	64	63	62	60	59	57	55	52	50	47	43	40	36	32	24
Vazão ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	0	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6	6,5	7	7,5	8	8,5	9	9,5	10	11
Potência hidráulica (W)	0	443	531	610	687	760	818	884	932	974	992	1022	1025	996	981	932	872	719
Eficiência Motobomba (%)	0,0	20,7	24,9	28,6	32,2	35,6	38,3	41,4	43,6	45,6	46,5	47,9	48,0	46,6	45,9	43,6	40,8	33,7

Fonte: Elaboração própria a partir de dados de [Schneider \(2022b\)](#).

Tabela 3.8 – Motobomba Leão, modelo 4R4PA-06 230, 6 estágios, de 0,5 cv.

LEÃO 4R4PA-06 230, 0,5 cv								
Altura manométrica (m.c.a.)	56,5	54,5	52	48	41,5	34	20,5	17
Vazão ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	0	0,6	1,4	2,1	2,9	3,6	4,5	4,7
Potência hidráulica (W)	0	89	198	275	328	334	251	218
Eficiência Motobomba (%)	0,0	10,0	22,2	30,8	36,8	37,4	28,2	24,4

Fonte: Elaboração própria a partir de dados de [Leão \(2021\)](#).

Tabela 3.9 – Motobomba Leão, modelo 4R6PB-06 230, 6 estágios, de 1 cv.

LEÃO 4R6PB-06 230, 1 cv								
Altura manométrica (m.c.a.)	46	43	35	33	31	29	26,5	23,5
Vazão (m ³ .h ⁻¹)	0	3	5,5	6	6,5	7	7,5	8
Potência hidráulica (W)	0	352	525	540	549	553	542	512
Eficiência Motobomba (%)	0,0	24,5	36,6	37,6	38,3	38,6	37,8	35,7

Fonte: Elaboração própria a partir de dados de [Leão \(2021\)](#).

Tabela 3.10 – Motobomba Leão, modelo 4R6PB-07 370, 7 estágios, de 1,5 cv.

LEÃO 4R6PB-07 370, 1,5 cv								
Altura manométrica (m.c.a.)	52,5	49	41	39	37	34	31	29
Vazão (m ³ .h ⁻¹)	0	3	5,5	6	6,5	7	7,5	8
Potência hidráulica (W)	0	401	614	638	655	649	634	632
Eficiência Motobomba (%)	0,0	18,0	27,6	28,7	29,5	29,1	28,5	28,4

Fonte: Elaboração própria a partir de dados de [Leão \(2021\)](#).

Tabela 3.11 – Motobomba Leão, modelo 4R6PB-09 370, 9 estágios, de 2 cv.

LEÃO 4R6PB-09 370, 2 cv								
Altura manométrica (m.c.a.)	71	64,5	56,5	54	50	47	45	41
Vazão (m ³ .h ⁻¹)	0	3	5,5	6	6,5	7	7,5	8
Potência hidráulica (W)	0	527	847	883	886	897	920	894
Eficiência Motobomba (%)	0,0	20,8	33,5	34,9	35,0	35,4	36,3	35,3

Fonte: Elaboração própria a partir de dados de [Leão \(2021\)](#).

Tabela 3.12 – Motobomba Leão, modelo 4R4PA-05 230, 5 estágios, de 0,5 cv.

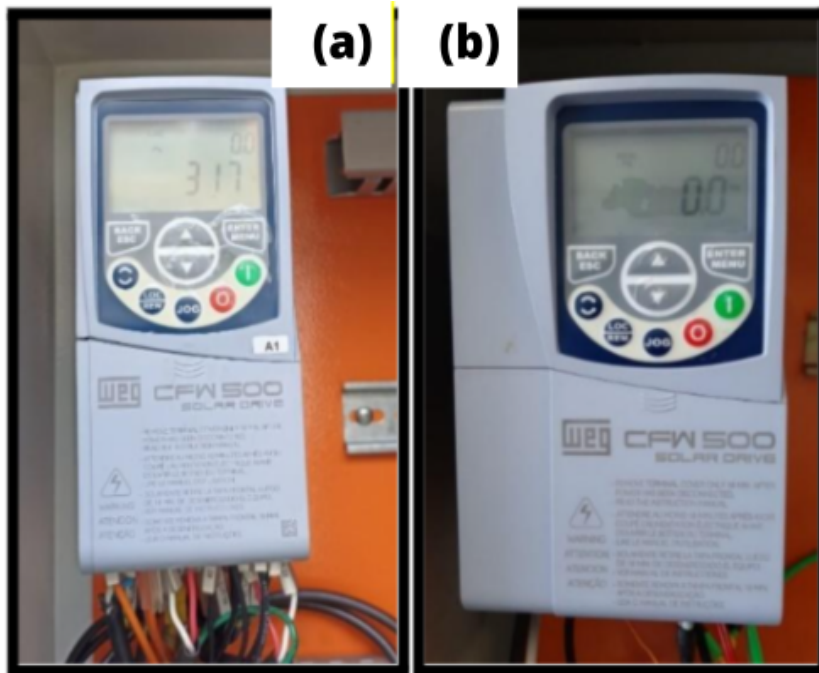
LEÃO 4R4PA-05 230, 0,5 cv								
Altura manométrica (m.c.a.)	46,5	45,5	43,5	41	35	29	17,5	15
Vazão (m ³ .h ⁻¹)	0	0,6	1,4	2,1	2,9	3,6	4,5	4,7
Potência hidráulica (W)	0	74	166	235	277	284	215	192
Eficiência Motobomba (%)	0,0	8,3	18,6	26,3	31,0	31,9	24,0	21,5

Fonte: Elaboração própria a partir de dados de [Leão \(2021\)](#).

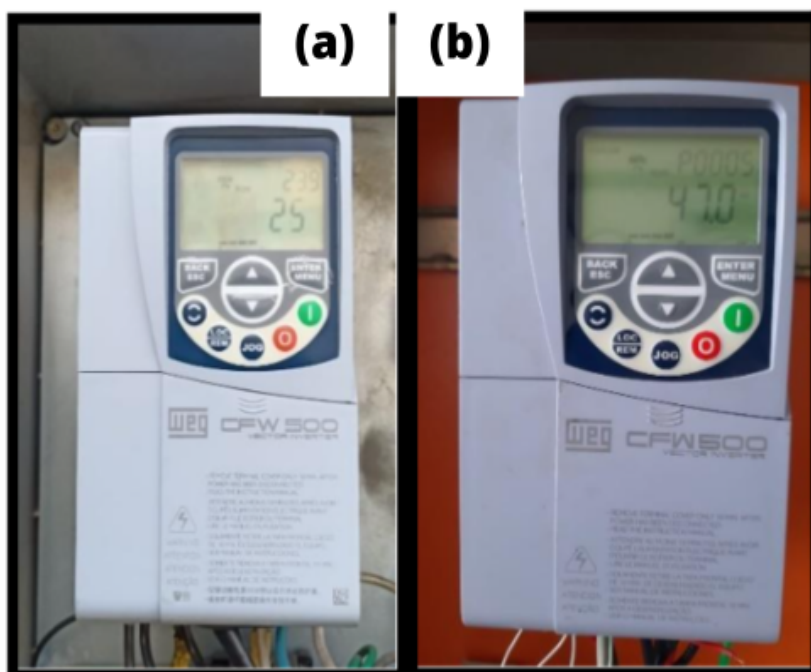
3.3.3 Conversores de frequência

Os conversores de frequência foram utilizados no presente trabalho para duas finalidades: (i) compatibilizar a potência proveniente do gerador fotovoltaico e os requerimentos elétricos do conjunto motobomba e (ii) permitir o ajuste e estabilização da altura manométrica dos sistemas de bombeamento fotovoltaico estudados. Para a primeira finalidade, empregou-se conversores de frequência da série CFW500-*Solar Drive* de 2 cv da fabricante WEG, tanto na USP (Figura 3.7 (a)) como na UNIFAP (Figura 3.7 (b)). No entanto, apesar de serem da mesma potência e série, há pequenas diferenças entre ambos em termos de mecânica construtiva (dimensões do equipamento), corrente nominal de saída e o número de fases (monofásico ou monofásico/trifásico). Por outro lado, para a finalidade de regulagem da pressão, utilizou-se, em ambos os laboratórios, conversores de frequência da série CFW500-*Vector Inverter* de 5 cv da fabricante WEG (Figuras 3.8 (a) e (b)) com as mesmas características.

Os conversores de frequência do modelo CFW500 - *Solar Drive* são equipamentos que podem operar em aplicações fotovoltaicas *off-grid*, como é o caso do bombeamento de água. Estes conversores são capazes de realizar o controle da tensão c.c. proveniente do gerador fotovoltaico por meio do Seguimento do Ponto de Máxima Potência (MPPT), além de permitir a utilização de controle escalar ou vetorial e também possibilitar o controle automático de partida e parada da motobomba em função dos níveis de irradiância ([WEG, 2018](#)). Por outro lado, os conversores de frequência do modelo CFW500 – *Vector Inverter* são desenvolvidos para controlar variáveis de processo em aplicações conectadas a rede elétrica, como a temperatura de fornos industriais e a pressão na saída das tubulações de bombas centrífugas convencionais. No entanto, desde que sejam adequadamente configurados, os conversores de frequência do modelo *Vector Inverter* também podem ser utilizados em SFB.

Figura 3.7 – Conversor de frequência CFW500- *Solar Drive*: (a) USP; (b) UNIFAP.

Fonte: Autoria própria (2023).

Figura 3.8 – Conversor de frequência CFW500- *Vector Inverter*: (a) USP; (b) UNIFAP.

Fonte: Autoria própria (2023).

As características técnicas dos conversores de frequência utilizados no presente trabalho estão sumarizadas na Tabela 3.13.

Tabela 3.13 – Características técnicas dos conversores de frequência utilizados.

	CFW500 – Solar Drive (USP)	CFW500 – Solar Drive (UNIFAP)	CFW500 – Vector Inverter (USP/UNIFAP)
Modelo	CFW500A07P0T2NB20H03SD	CFW500B07P3B2DB20H03SD	CFW500B16P0T2DB20
Mecânica construtiva	Tipo A (189 mm x 75 mm x 150 mm)	Tipo B (199 mm x 100 mm x 160 mm)	
Número de fases de entrada	Trifásico	Monofásico/ Trifásico	Trifásico
Tensão nominal de entrada	200 – 240 Vca (corrente alternada)		
Corrente nominal de saída	7A	7,3A	16A
Potência máxima do motor	2 cv (1,5 kW)		5 cv (3,7 kW)

Fonte: Folha de dados da [WEG \(2019\)](#).

3.4 DESCRIÇÃO GERAL DAS ETAPAS EXPERIMENTAIS

Os ensaios realizados no presente trabalho envolveram quatro etapas distintas. A primeira atividade consistiu na realização dos ensaios de caracterização da curva I-V (Corrente em função da Tensão) e P-V (Potência em função da Tensão) dos geradores fotovoltaicos utilizados para alimentar as motobombas. Tais ensaios permitiram a determinação da potência nominal (P_{GFV}) real de cada um dos geradores fotovoltaicos. Tal caracterização é especialmente importante em situações nas quais os módulos solares já foram expostos a intempéries (sujeira, umidade) por um tempo prolongado, o que é o caso do presente estudo.

A segunda e terceira etapas envolveram a execução de ensaios de caracterização de sistemas fotovoltaicos de bombeamento com fonte de tensão estabilizada em corrente contínua. Em ambas as etapas, o procedimento experimental, descrito posteriormente, foi o mesmo, mas a finalidade foi distinta.

Na segunda atividade, visou-se compreender o comportamento das motobombas sob teste em diferentes alturas manométricas, através da determinação das curvas $Q - H_{man}$ (Vazão em função da Altura Manométrica), $E_{ff} - H_{man}$ (Eficiência em função da Altura Manométrica) e $Q - P$ (Vazão em função da Potência c.c.). As curvas $Q - H_{man}$ foram obtidas a fim de comparar a vazão ($m^3 \cdot h^{-1}$) real da motobomba na frequência nominal para uma dada altura manométrica com aquela declarada no catálogo do fabricante. A obtenção das curvas $E_{ff} - H_{man}$ permitiu comparar a eficiência real da motobomba em diferentes pressões com a eficiência calculada a partir de dados do manual técnico do equipamento. Além disso, essas curvas foram utilizadas para validar se a altura manométrica de maior eficiência associada aos dados de catálogo é compatível com a obtida experimentalmente. Já com as curvas $Q - P$, foi possível determinar a potência mínima necessária para o início do processo de bombeamento, bem

como a potência mínima requerida para as motobombas operarem em sua frequência nominal nas diferentes alturas manométricas e, assim, entregarem sua vazão máxima.

Na terceira atividade, os ensaios com a fonte de tensão foram realizados com uma mesma motobomba (denominada de padrão de teste) em ambas as universidades (UNIFAP e USP), a fim de obter as curvas $Q - H_{man}$. O objetivo destes testes foi comparar a diferença entre as medições de vazão bombeada ($m^3 \cdot h^{-1}$) em diferentes alturas manométricas, resultante da utilização de duas bancadas laboratoriais distintas. Essa comparação foi feita a fim de demonstrar a reprodutibilidade e garantir a confiabilidade dos resultados obtidos durante os ensaios de caracterização de motobombas.

Na quarta e última etapa, foram realizados, tanto na UNIFAP como na USP, ensaios a sol real para caracterização das configurações de sistemas fotovoltaicos de bombeamento sob estudo. Para tal, os diferentes geradores fotovoltaicos foram utilizados como fonte de tensão em corrente contínua para alimentar as motobombas. O objetivo principal deste ensaio foi mensurar o volume bombeado ao longo de um ciclo por motobombas de variadas potências em diferentes níveis de irradiação global, alturas manométricas e potências de gerador fotovoltaico. Os dados coletados foram utilizados para a construção de um modelo empírico de predição do volume bombeado. Adicionalmente, a partir destes dados também foram geradas as curvas $Q - I_g$ (Vazão em função da Irradiância no plano do gerador fotovoltaico). Estas curvas permitiram, por exemplo, validar se o gerador fotovoltaico escolhido previamente para acionar as motobombas sob teste é capaz de fazê-la operar a vazão máxima. Para essa validação, foram utilizadas curvas $Q - I_g$ obtidas em dias de céu mais limpo, ou seja, com menor proporção de irradiação difusa (PD), pois, dessa forma, haveria irradiação suficiente para que a motobomba entregue a vazão nominal.

3.5 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS PARA REALIZAÇÃO DAS ETAPAS EXPERIMENTAIS

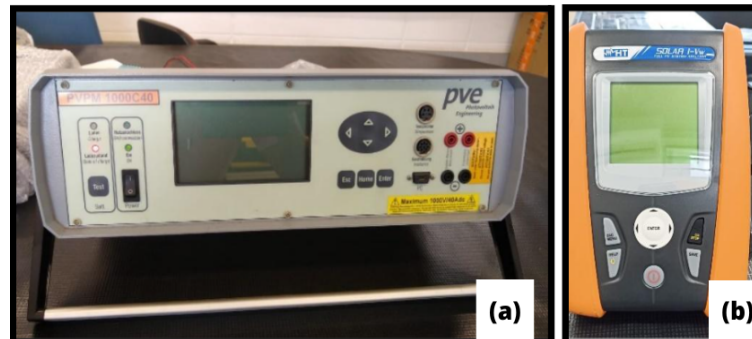
Neste item são descritos os procedimentos metodológicos adotados para realização dos ensaios de caracterização das curvas I-V (Corrente em função da Tensão) e P-V (Potência em função da Tensão) de geradores fotovoltaicos e dos testes de caracterização de sistemas fotovoltaicos de bombeamento com fonte de tensão estabilizada e a sol real.

3.5.1 Teste para obtenção de curvas características do gerador fotovoltaico

Para obtenção das curvas características dos geradores fotovoltaicos utilizados, foram utilizados, na USP, o traçador de curvas modelo PVPM 1000C 40 do fabricante PVE (Figura 3.9 (a)), e na UNIFAP, o medidor fotovoltaico modelo Solar IVw (Figura 3.9 (b)) da empresa *HT Instruments*. Ambos os medidores têm capacidade de medir módulos/fileiras com até 1000 Vcc. No entanto, a capacidade de medição de corrente é maior no equipamento PVPM 1000C

40 (40 A) do que no Solar IVw (15 A).

Figura 3.9 – Medidores de curvas características de geradores fotovoltaicos: (a) PVPM 1000 C 40; (b) Solar IVw.



Fonte: Autoria própria (2023).

3.5.1.1 Método de operação do traçador de curvas PVPM 1000C 40

A PVE é um dispositivo traçador de curvas tensão-corrente e potência-corrente modelo PVPM-1000C 40 (Figura 3.10) de fabricação Alemã. Este equipamento possui, internamente, uma carga capacitiva que permite polarizar um módulo ou gerador fotovoltaico. Sua capacidade nominal para caracterizar módulos e geradores fotovoltaicos é de 1000 V e 40 A, com uma exatidão de $\pm 5\%$ na medição de potência (PVE, 2023). A PVE mede a irradiância global através da seleção de uma das três opções de células de referência do fabricante ISET (monocristalino, policristalino e silício-amorfo), sendo que cada uma delas tem um sensor de temperatura embutido tipo Pt-1000. Opcionalmente pode-se usar um sensor de temperatura externo para fixar na parte posterior do módulo fotovoltaico. A medição de corrente e tensão é realizada pelo método a quatro fios com a finalidade de diminuir os erros sistemáticos de medição de tensão. Os parâmetros que a PVE mostra após cada medição são: potência máxima, resistência série, resistência paralela, tensão de máxima potência, corrente de máxima potência, tensão de circuito aberto, corrente de curto-circuito, fator de forma, temperatura da célula e irradiância global.

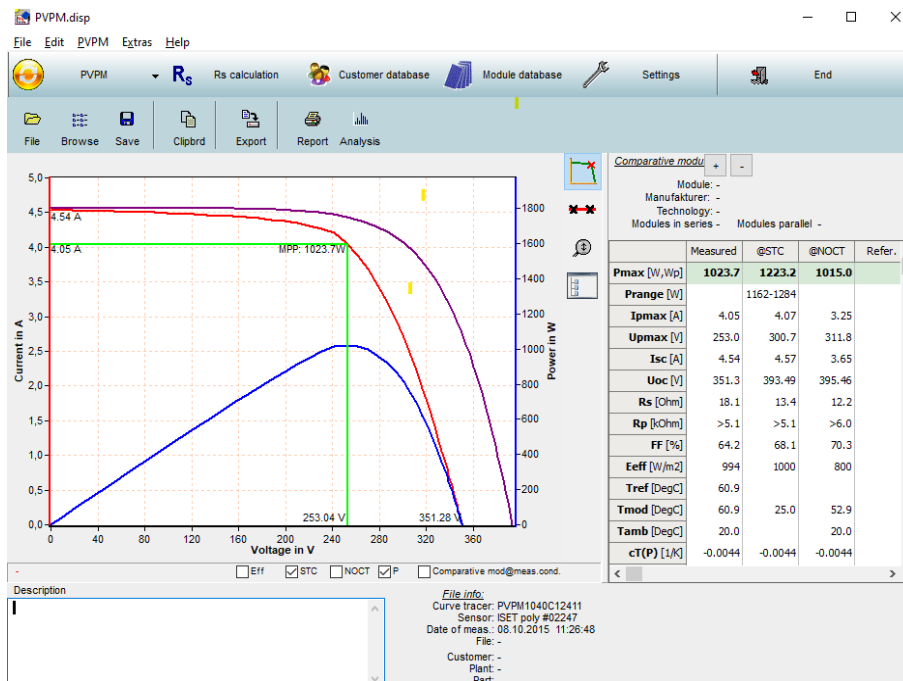
Figura 3.10 – Traçador de curva I-V modelo PVPM 1000C 40, juntamente com os três tipos de células de referência ISET e a chave seccionadora PVPM-LTSX1000.



Fonte: Autoria própria (2023).

O procedimento para caracterizar um módulo ou gerador fotovoltaico com a PVE seguiu os seguintes passos: selecionou-se uma célula de referência adequada ao tipo de tecnologia (monocristalino, policristalino ou silício-amorfo) do gerador fotovoltaico, fez-se as conexões elétricas de potência entre o arranjo fotovoltaico e a caixa de seccionamento PVPM-LTSX1000, e fixou-se a célula de referência coplanar ao arranjo fotovoltaico. Na sequência, conferiu-se a ligação e fechou-se a chave de seccionamento para executar a medição. Após um breve período, a PVE emitiu um relatório gráfico (Figura 3.11) com a curva I-V e P-V, onde se apresentaram os valores nas condições reais de operação e os valores corrigidos para as condições de teste padrão. A correção dos valores reais para a condição padrão foi realizada pelo *software* PVPM.disp.

Figura 3.11 – Exemplo de relatório de curva I-V realizado pelo *software* PVPM.disp.



Fonte: Autoria própria (2023).

3.5.1.2 Método de operação do traçador de curvas Solar IVw

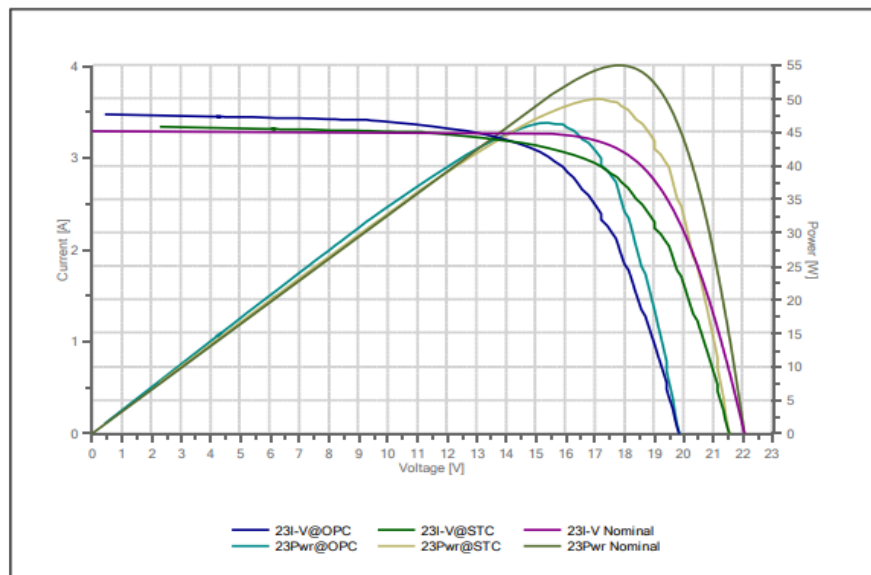
A obtenção das curvas I-V e P-V foi feita através da polarização do gerador fotovoltaico desde a corrente de curto-circuito até a corrente de circuito aberto, utilizando o equipamento Solar IVw da *HT Instruments*. Os dados de irradiância e temperatura foram obtidos por meio de comunicação de radiofrequência com a sua unidade remota SOLAR-02. Seguindo o manual de operação do traçador (*HT INSTRUMENTS, 2017*), inicialmente, foi realizado o cadastro das informações referentes aos geradores FV da *Yingli Solar* e da *Komaes* (quantidade de módulos utilizados, tensão de circuito aberto – V_{oc} , corrente de curto-circuito – I_{sc} , ponto de máxima potência – P_{mp} , tensão de máxima potência – V_{mp} e corrente de máxima potência – I_{mp})

no equipamento Solar IVw. Realizou-se também a inserção, na unidade remota, dos dados de sensibilidade e do coeficiente alfa referentes à célula calibrada. Este sensor de irradiância foi posicionado no mesmo plano inclinado do que o gerador fotovoltaico testado.

Após a inserção dos dados, foram feitas as conexões entre os terminais do gerador fotovoltaico e os terminais de entrada do Solar IVw para medição dos dados de tensão e corrente. A unidade remota SOLAR-02 possui dois terminais nos quais foram conectadas a célula calibrada e a ponta de prova externa. Esta última foi utilizada para medir a temperatura na parte posterior do gerador fotovoltaico.

O medidor Solar IVw foi acionado para realizar o levantamento dos pares de ponto corrente-tensão (I-V) e potência-tensão (P-V) e, ao final do teste, a partir dos dados de irradiância e da temperatura da parte posterior do gerador fotovoltaico coletados pelos sensores e enviados ao SOLAR-02, foram calculados automaticamente tanto os parâmetros elétricos (V_{oc} , I_{sc} , P_{mp} , V_{mp} , I_{mp}) para as condições STC (referente a um único módulo FV) e para condições operacionais (relativa ao gerador fotovoltaico) como também o desvio entre a potência nominal de placa (cadastrada inicialmente) e a medida no ensaio. Além disso, foram geradas as curvas I-V e P-V, as quais foram armazenadas na memória do Solar IVw e, posteriormente, foram recuperadas pelo aplicativo de celular da *HT Instruments*. Deste, tais curvas foram encaminhadas por e-mail e puderam ser acessadas no *software desktop* da fabricante, o qual contém ferramentas para processar e estilizar os gráficos para produção de relatórios (Figura 3.12).

Figura 3.12 – Exemplo de relatório de curva I-V obtido pelo *software* da *HT Instruments*.

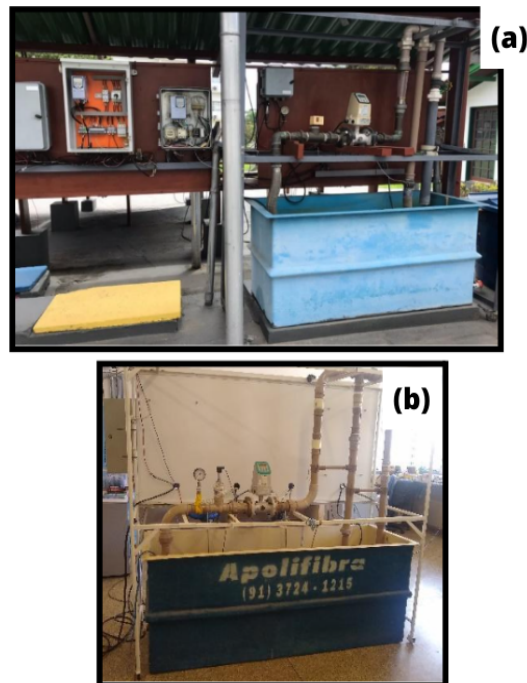


Fonte: Autoria própria (2023).

3.5.2 Teste para caracterização de motobombas

Os ensaios de caracterização dos sistemas fotovoltaicos de bombeamento com a fonte de tensão estabilizada e a sol real foram desenvolvidos em bancadas de ensaios que permitem a manutenção de pressões (alturas manométricas) em regime permanente durante todo o experimento. Tais bancadas são compostas por duas motobombas submersas em um mesmo reservatório: uma delas é aquela que está sendo submetida ao teste e a outra é a motobomba reguladora de pressão. A motobomba sob teste é alimentada diretamente pelo conversor de frequência CFW500 *Solar Drive*, o qual está conectado ao gerador fotovoltaico ou à fonte de tensão estabilizada. Por outro lado, a motobomba reguladora da pressão é alimentada pelo conversor de frequência CFW500 *Vector Inverter*, o qual está conectado à rede elétrica. As Figuras 3.13 (a) e (b) ilustram, respectivamente as bancadas de ensaio de bombeamento da USP e da UNIFAP.

Figura 3.13 – Vistas das bancadas de ensaio de bombeamento: (a) LSF – IEE/USP; (b) UNIFAP.



Fonte: Autoria própria (2023).

A bancada do LSF – IEE/USP possui uma capacidade de simular alturas manométricas de até 100 m.c.a. e $32 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ (BRITO; FEDRIZZI; ZILLES, 2007), enquanto a bancada da UNIFAP simula pressões de até 75 m.c.a. e $32 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$. O valor máximo de altura manométrica que uma dada bancada experimental pode simular está diretamente relacionado à máxima pressão que sua tubulação pode suportar.

O princípio de funcionamento das bancadas capazes de simular alturas manométricas em regime permanente é o seguinte: inicialmente, energiza-se a bancada de ensaios e configura-se um *set-point* desejado para altura manométrica, através do ajuste do parâmetro P0525 do con-

versor de frequência que controla a motobomba reguladora de pressão (CFW500 *Vector Inverter*). O ajuste fino da altura manométrica é realizado por meio da regulagem de uma válvula de registro, que deve ser estrangulada até que a altura manométrica permaneça estável e que a frequência da motobomba reguladora da pressão, em condições de baixa irradiância, não seja tão próxima de sua frequência nominal. Tal procedimento é feito para evitar o sobreaquecimento da água do reservatório decorrente do aumento da potência requerida pela motobomba mantenedora de pressão em dias nublados (MELENDEZ, 2009).

Quando a bancada está em funcionamento, o controlador PID do *Vector Inverter* compara o valor de *set-point* estabelecido e o valor da tensão de realimentação proveniente do transdutor de pressão posicionado na tubulação de saída da motobomba testada e atua para que o erro entre eles seja próximo de zero (isto é, que esses valores sejam iguais). Dessa forma, enquanto a motobomba sob teste eleva (reduz) sua capacidade de bombeamento em função do aumento (decréscimo) da irradiância coletada pelo gerador fotovoltaico (ou da corrente disponibilizada pela fonte de tensão estabilizada), a motobomba mantenedora de pressão reduz (eleva) seu volume bombeado, a fim de manter a pressão em torno do *set-point* estabelecido (BRITO; FEDRIZZI; ZILLES, 2007).

As motobombas mantenedoras da altura manométrica utilizadas estão descritas na Tabela 3.14. É importante que a motobomba reguladora da pressão tenha capacidade de bombeamento maior do que a apresentada pela motobomba sob teste à mesma altura manométrica, pois a simulação da pressão é baseada na perda de carga na válvula de registro e esta perda é proporcional à vazão de bombeio.

Tabela 3.14 – Associação entre motobombas sob teste e motobombas utilizadas para controle da pressão.

Motobomba sob teste	Motobomba controladora da altura manométrica
Leão 0,5 e 1 cv	Schneider 1 cv
Schneider 0,5 e 1 cv	Dancor 2 cv
Leão 1,5 e 2 cv	Grundfos 4 cv
Schneider 1,5 e 2 cv	

Fonte: Autoria própria (2023).

3.5.2.1 Procedimento para realização dos ensaios com a fonte de tensão estabilizada

A partir dos ensaios com a fonte de tensão estabilizada, foi possível determinar as curvas características (Vazão em função da Altura manométrica, Eficiência em função da Altura manométrica e Vazão em função da Potência c.c.) das diferentes motobombas avaliadas. As fontes de tensão estabilizada são equipamentos que recebem alimentação da rede elétrica em corrente alternada (geralmente, 220 Vca) e a transforma em corrente contínua, direcionando-a

ao conversor de frequência da motobomba sob teste.

Na USP, foi utilizada a fonte de tensão estabilizada de 500 Vcc/10 A (Figura 3.14) do fabricante *Tectrol*. Neste equipamento, é possível ajustar a tensão ou a corrente de saída desejada por meio de potenciômetros. Ele também é dotado de disjuntor de entrada, que o protege contra sobrecargas provenientes da rede elétrica.

Figura 3.14 – Fonte de tensão estabilizada 500 Vcc/10 A da *Tectrol*.



Fonte: Autoria própria (2023).

Por outro lado, na UNIFAP, utilizou-se como fonte de tensão estabilizada o simulador de arranjo fotovoltaico E4362A (Figura 3.15) da fabricante *Agilent*. Este simulador c.c é composto por dois módulos conectados em série (Figura 3.16). Cada módulo possui uma tensão entre 0-120 Vcc, corrente de até 5 A e uma potência de 600 W. Dessa forma, o equipamento é capaz de fornecer uma tensão de até 240 Vcc e uma potência de 1200 W. É possível ajustar a tensão ou a corrente de saída desejada através do teclado numérico presente no painel frontal do equipamento.

Figura 3.15 – Vista frontal do simulador de arranjo fotovoltaico E4362A da *Agilent*.



Fonte: Autoria própria (2023).

Figura 3.16 – Vista traseira dos módulos que compõem o simulador E4362A da Agilent.



Fonte: Autoria própria (2023).

Para realização dos ensaios, no caso da USP, ajustou-se a fonte c.c. para trabalhar em uma tensão constante de 320 Vcc e corrente variável em função da rampa de aceleração ou desaceleração do *Solar Drive*, o qual alimenta diretamente a motobomba sob teste. Já no caso da UNIFAP, em função da limitação da tensão c.c que pode ser fornecida pelos dois módulos em série que compõem o simulador de arranjo fotovoltaico, configurou-se sua operação a uma tensão constante de aproximadamente 240 Vcc e corrente variável. Para garantir que a potência c.a. fornecida à motobomba seja suficiente para atender seus requerimentos elétricos, o *Solar Drive* compensa o menor valor da tensão c.c. fornecida pelo simulador por meio do aumento da corrente liberada.

Após a regulagem da tensão c.c. a ser fornecida pelas fontes, realizou-se o ajuste da altura manométrica nas bancadas de ensaios, conforme explicado anteriormente. As alturas manométricas de ensaio com a fonte c.c. para cada uma das motobombas sob teste estão descritas na Tabela 3.15.

Tabela 3.15 – Alturas manométricas de realização dos testes de caracterização de motobombas com fonte c.c. para as diferentes configurações avaliadas.

Configuração	Motobomba testada	Altura manométrica de ensaio (m.c.a.)
1	Schneider SUB15 -05NY4E4 (0,5cv)	25 – 40
2	Schneider SUB25-10NY4E6 (1 cv)	25, 30, 35, 40, 45, 50, 55 e 60
3	Schneider SUB40-15S4E6 (1,5 cv)	30 – 40
4	Schneider SUB40-20S4E8 (2 cv)	40-48, 50
5	Leão 4R4PA-06 230 (0,5 cv)	25, 30, 34, 35, 40, 45 e 50
6	Leão 4R6PB-06 230 (1 cv)	15, 20, 25 – 42
7	Leão 4R6PB-07 370 (1,5 cv)	30 - 45
8	Leão 4R6PB-09 370 (2 cv)	38-48, 50
9	Leão 4R4PA-05 230 (0,5 cv)	15, 20, 25, 30, 32, 35 e 40.

Nota: itens destacados em **negrito** correspondem a ensaios feitos com incrementos de 1 em 1 m.c.a. na altura manométrica dentro daquele intervalo.

Fonte: Autoria própria (2023).

Na sequência, alguns parâmetros do CFW500 *Solar Drive* foram configurados para possibilitar o acionamento de rampas de aceleração e desaceleração da motobomba sob teste. Os parâmetros ajustados e suas configurações estão descritos na Tabela 3.16. Como este é um ensaio que pode ser realizado dentro de poucos minutos, foi mais conveniente realizar o acionamento manual dos botões do *Solar Drive* responsáveis pela aceleração e desaceleração da motobomba. Para que o acionamento manual fosse possível, foi necessário configurar o parâmetro seleção da fonte (P0220) para o modo LOCAL.

Tabela 3.16 – Configuração de parâmetros do CFW500 *Solar Drive* para teste com fonte c.c.

Parâmetro do CFW500 – <i>Solar Drive</i>	Descrição	Configuração adotada
P0100	Tempo de aceleração	300 s
P0101	Tempo de desaceleração	300 s
P0133	Velocidade mínima	60 Hz
P0220	Seleção da fonte	0 = Sempre Local

Fonte: Autoria própria (2023).

3.5.2.2 Procedimento para realização dos ensaios a sol

Os ensaios a sol real foram executados com o objetivo de determinar a capacidade de produção diária de água de sistemas fotovoltaicos de bombeamento em função de variáveis como a altura manométrica, a potência do gerador fotovoltaico e a irradiação global no plano do gerador fotovoltaico. Tais ensaios foram realizados nas alturas manométricas de maior eficiência de cada uma das oito motobombas sob teste, visto que, nessas situações, estes equipamentos operam de forma a minimizar as vibrações, desgastes e perdas hidráulicas, o que resulta em menores custos de operação e manutenção (U.S. DEPARTMENT OF ENERGY; HYDRAULIC INSTITUTE, 2006). As alturas manométricas de ensaio a sol real para cada uma das motobombas sob teste estão descritas na Tabela 3.17.

Tabela 3.17 – Alturas manométricas de realização dos testes de caracterização de motobombas a sol real para as diferentes configurações avaliadas.

Configuração	Motobomba testada	Altura manométrica de ensaio (m.c.a.)
1	Schneider SUB15 -05NY4E4 (0,5cv)	30
2	Schneider SUB25-10NY4E6 (1 cv)	48
3	Schneider SUB40-15S4E6 (1,5 cv)	35
4	Schneider SUB40-20S4E8 (2 cv)	45
5	Leão 4R4PA-06 230 (0,5 cv)	34
6	Leão 4R6PB-06 230 (1 cv)	29
7	Leão 4R6PB-07 370 (1,5 cv)	35
8	Leão 4R6PB-09 370 (2 cv)	45

Fonte: Autoria própria (2023).

Para realização dos ensaios de desempenho de motobombas a sol real, inicialmente, as bancadas foram ajustadas para simular as alturas manométricas descritas na Tabela 3.17. Na sequência, realizou-se a configuração de alguns parâmetros do conversor de frequência que controla a motobomba sob teste (CFW500 *Solar Drive*), os quais estão descritos na Tabela 3.18. O modo REMOTO de seleção da fonte permite ligar, de maneira remota, a bancada através de um *timer* programável. Este dispositivo foi configurado, em ambos os laboratórios, para acionar a bancada de testes às 6h30 e desligá-la às 17h30.

Tabela 3.18 – Configuração de parâmetros do CFW500 *Solar Drive* para testes a sol real.

Parâmetro do CFW500 – <i>Solar Drive</i>	Descrição	Configuração adotada
P0100	Tempo de aceleração	0,3 s
P0101	Tempo de desaceleração	0,3 s
P0133	Velocidade mínima	20 Hz
P0220	Seleção da fonte	1 = Sempre Remoto

Fonte: Autoria própria (2023).

3.6 INSTRUMENTAÇÃO DAS BANCADAS DE ENSAIO

Durante a realização dos ensaios de caracterização dos sistemas fotovoltaicos de bombeamento estudados, diversas variáveis importantes foram mensuradas. Em ambos os testes (com fonte c.c. ou a sol real), foram feitas medições de corrente elétrica (A) e tensão de operação (da fonte c.c. ou do gerador fotovoltaico), altura manométrica (m.c.a.) e vazão bombeada pela motobomba sob teste ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$). Nos ensaios a sol real, coletaram-se também dados de irradiância global e difusa no plano horizontal e irradiância global no plano do gerador fotovoltaico. As medidas de irradiância obtidas em $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ e através da integralização se obteve as irradiações, em $\text{kWh} \cdot \text{m}^{-2}$.

No LSF, as irradiâncias global e difusa no plano horizontal foram medidas a partir da estação solarimétrica (Figura 3.17) situada no mesmo local em que está a bancada de ensaio de bombeamento; já as demais variáveis foram coletadas a partir de transdutores ligados a um coletor de dados. Na UNIFAP, todas as sete (7) variáveis foram monitoradas via transdutores conectados a um *datalogger*.

Figura 3.17 – Estação solarimétrica do LSF-IEE/USP.



Fonte: Autoria própria (2023).

Os instrumentos utilizados na USP e na UNIFAP para monitorar tais variáveis, são descritos, respectivamente, nas Tabelas 3.19 e 3.20. É descrita também a frequência de coleta de dados relativa a cada um dos sensores nos diferentes testes (com fonte c.c. ou a sol real).

Tabela 3.19 – Características da instrumentação da bancada de ensaio de bombeamento e da estação solarimétrica do IEE/USP.

Variável monitorada (Unidade)	Sensor	Marca e Modelo	Sinal de saída (Sinal de entrada)	Constante de calibração (CC) ou ganho (G)	Frequência de medição
Irradiação global no plano horizontal (kWh.m^{-2})	Piranômetro de termopilha	<i>Kipp & Zonnen</i> CM11	—————	$CC = \frac{5,37 \text{ mV}}{1000 \text{ W.m}^{-2}}$	Sol real: Horária
Irradiação difusa no plano horizontal (kWh.m^{-2})	Piranômetro de termopilha	<i>Kipp & Zonnen</i> CM11	—————	$CC = \frac{5,10 \text{ mV}}{1000 \text{ W.m}^{-2}}$	
Irradiância global no plano do gerador FV (W.m^{-2})	Módulo de referência de silício policristalino com 36 células	<i>Solaris</i> S10P	0 – 150 mV (0 – 1,5 A)	$CC = \frac{68,66 \text{ mV}}{1000 \text{ W.m}^{-2}}$	Sol real: A cada 10 s
Corrente elétrica do gerador FV ou da fonte c.c.(A)	Resistor <i>shunt</i>	—————	0 – 150 mV (0 – 20 A)	$G = \frac{0,133 \text{ A}}{\text{mV}}$	Fonte c.c.: A cada 1 s Sol real: A cada 10 s
Tensão de operação do gerador FV ou da fonte c.c.(V)	Transdutor de tensão	ABB ETI 50	0– 10 V (0 - 500 V)	$G = 50 \text{ V/V}$	
Altura manométrica de operação (m.c.a.)	Transdutor de pressão	MPM B- 12 Transmissor MOD. ST	0 – 10 V (0 – 100 m.c.a.)	$G = \frac{10 \text{ m.c.a.}}{\text{V}}$	
Vazão ($\text{m}^3.\text{h}^{-1}$)	Hidrômetro	<i>Siemens</i> SITRANS F M MAGFLO MAG 5000	0 – 20 mA (0 – 10 $\text{m}^3.\text{h}^{-1}$)	$G = \frac{0,490 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}}{\text{mA}}$	

Fonte: Autoria própria (2023).

Tabela 3.20 – Características da instrumentação da bancada de ensaio de bombeamento da UNI-FAP.

Variável monitorada (Unidade)	Sensor	Marca e Modelo	Sinal de saída (Sinal de entrada)	Constante de calibração (CC) ou ganho (G)	Frequência de medição
Irradiação global no plano horizontal (kWh.m^{-2})	Célula calibrada	<i>Tritec Spektron</i> 210	—————	$CC = \frac{76,53 \text{ mV}}{1000 \text{ W.m}^{-2}}$	Sol real: Horária
Irradiação difusa no plano horizontal (kWh.m^{-2})	Célula calibrada	<i>Tritec Spektron</i> 210	—————	$CC = \frac{75,10 \text{ mV}}{1000 \text{ W.m}^{-2}}$	
Irradiância global no plano do gerador FV (W.m^{-2})	Módulo de referência de silício policristalino com 36 células	<i>Solaris S10P</i>	0 – 150 mV (0 - 1,5 A)	$CC = \frac{71,48 \text{ mV}}{1000 \text{ W.m}^{-2}}$	
Corrente elétrica do gerador FV ou da fonte c.c.(A)	Resistor <i>shunt</i>	—————	0 – 150 mV (0 – 8 A)	$G = \frac{0,0533 \text{ A}}{\text{mV}}$	Fonte c.c: A cada 1 s Sol real: A cada 10 s
Tensão de operação do gerador FV ou da fonte c.c.(V)	Transdutor de tensão	ABB ETI 50	0– 10 V (0 - 500 V)	$G = 50 \text{ V/V}$	
Altura manométrica de operação (m.c.a.)	Transdutor de pressão	TER-PRESS	0 – 10 V (0 – 100 m.c.a.)	$G = \frac{10 \text{ m.c.a.}}{\text{V}}$	
Vazão ($\text{m}^3.\text{h}^{-1}$)	Hidrômetro	<i>Siemens</i> SITRANS F M MAGFLO MAG 5000	4 – 20 mA (0 – 10 $\text{m}^3.\text{h}^{-1}$)	$G = \frac{0,625 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}}{\text{mA}}$ $D = 2,5 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$	

Fonte: Autoria própria (2023).

A compilação e organização dos dados referentes aos ensaios com a fonte c.c. envolvem os passos a seguir:

1. Calcular a potência c.c. requerida pela motobomba (W) em diferentes frequências (incluindo a frequência nominal, 60 Hz), a partir da multiplicação dos dados coletados de corrente e tensão da fonte c.c.
2. Filtrar os pontos com frequência nominal igual ou maior que 60 Hz e com altura manométrica $\pm 0,2$ m.c.a. Por exemplo, para ensaios a uma pressão de 40 m.c.a., foram considerados apenas os dados com altura manométrica entre 39,8 m.c.a. e 40,2 m.c.a.
3. Calcular os valores médios das medições de vazão ($m^3 \cdot h^{-1}$), altura manométrica (m.c.a.) e potência c.c nas condições nominais.
4. Calcular a eficiência do conjunto motobomba (%), a partir dos valores médios de vazão, altura manométrica e potência c.c medidos quando o motor opera em sua frequência nominal, utilizando a Equação 2.7 descrita na Revisão de Literatura.
5. Obter, por meio de regressão quadrática, as curvas $Q - H_{man}$ (Vazão em função da Altura Manométrica) para cada uma das motobombas a partir dos dados experimentais (compilados no passo 3) e a partir dos dados constantes no catálogo do fabricante. Após isso, realizar o cálculo do MAPE (Erro Médio Percentual Absoluto) para computar a diferença média entre as curvas de regressão⁴. Por fim, calcular o Erro Máximo Percentual Absoluto (EMPA) para determinar a maior divergência entre os dados medidos e as especificações declaradas nos manuais técnicos dos equipamentos. As motobombas citadas aqui correspondem àquelas das configurações 1 a 8 da Tabela 3.1 (página 61).
6. Obter as alturas manométricas de maior eficiência para cada uma das motobombas das configurações 1 a 8 da Tabela 3.1 (página 61), a partir do traçado das curvas $E_{ff} - H_{man}$ (Eficiência em função da Altura Manométrica).
7. Obter, por meio de regressão logarítmica, as curvas $Q - P$ (Vazão em função da Potência c.c.) em diferentes alturas manométricas para as motobombas das configurações 1 a 8 da Tabela 3.1 (página 61). Foram desconsiderados para análise, pontos com vazão igual a $0 m^3 \cdot h^{-1}$.
8. Obter as curvas $Q - H_{man}$ (Vazão em função da Altura Manométrica) para a motobomba padrão de teste a partir dos dados (computados no passo 3) provenientes tanto dos ensaios feitos na USP como na UNIFAP. Como os dados de vazão em ambas as bancadas foram

⁴ Como os intervalos de altura manométrica nos quais se realizaram os ensaios de caracterização de motobombas não foram exatamente os mesmos daqueles constantes nos manuais técnicos dos equipamentos, a comparação entre as curvas (isto é, a determinação do MAPE) foi feita apenas para o intervalo comum de altura manométrica entre ambas as curvas.

coletados praticamente nas mesmas alturas manométricas, o passo seguinte foi realizar o cálculo do MAPE (Erro Médio Percentual Absoluto) para computar a diferença média entre as vazões medidas em ambas universidades para as diferentes pressões. A motobomba padrão de teste é a descrita na configuração 9 da Tabela 3.1) (página 61).

A compilação e a organização dos resultados provenientes dos testes com fonte c.c. foram feitas no *Excel*®, com exceção do cálculo do MAPE e do EMPA. Essas métricas foram calculadas no *software Rstudio*® a partir, respectivamente, da função MAPE do pacote *MLmetrics* e de uma função implementada no código para cálculo do erro máximo. O cálculo do MAPE pode ser feito a partir da Equação 3.2, enquanto a Equação 3.3 permite o cálculo do EMPA:

$$MAPE(\%) = \left(\frac{1}{n} * \sum_{i=1}^n \left| \frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right| \right) * 100 \quad (3.2)$$

$$EMPA(\%) = \max \left(\sum_{i=1}^n \left| \frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right| \right) * 100 \quad (3.3)$$

onde:

n – número de observações (amostras).

y_i – valor de referência.

\hat{y}_i – valor predito.

Na quinta etapa do processo de compilação e organização dos dados provenientes dos ensaios, as curvas obtidas com os dados experimentais foram consideradas como valores de referência para o cálculo do MAPE e do EMPA; já na oitava etapa, o conjunto de pontos tomados como valor de referência foram aqueles obtidos nos ensaios feitos na USP.

A compilação dos resultados obtidos nos ensaios de caracterização de motobombas a sol real foi feita utilizando planilha eletrônica *Excel*®. Inicialmente, os dados de irradiação horária obtidos a partir da estação solarimétrica do LSF foram somados para computar a irradiação global e difusa diária no plano horizontal. Os dados de irradiância ($W.m^{-2}$) e vazão ($m^3.h^{-1}$), coletados a cada 10 segundos, foram integralizados ao longo do dia, permitindo a determinação, respectivamente, da irradiação diária ($kWh.m^{-2}.dia^{-1}$) e do volume diário bombeado ($m^3.dia^{-1}$). A altura manométrica referente a um determinado dia correspondeu ao valor médio das pressões monitoradas durante aquele ciclo. Dessa forma, cada observação (amostra) era composta por um conjunto de medições, de diferentes variáveis, ao longo de um dia (isto é, das 6h às 18h).

A Tabela 3.21 apresenta algumas informações sobre os ensaios para avaliação do volume de água bombeado pelos diferentes Sistemas Fotovoltaicos de Bombeamento.

Tabela 3.21 – Descrição dos ensaios a sol real realizados para as diferentes configurações de Sistema Fotovoltaico de Bombeamento.

Configuração	Motobomba testada	Período de realização dos ensaios	Número de amostras (dias de ensaio) na altura manométrica de maior eficiência
1	Schneider SUB15 -05NY4E4 (0,5cv)	Jun/2021 – Jul/2021	11
2	Schneider SUB25-10NY4E6 (1 cv)	Out/2021 – Nov/2021	28
3	Schneider SUB40-15S4E6 (1,5 cv)	Mai/2021 – Jul/2021	27
4	Schneider SUB40-20S4E8 (2 cv)	Jul/2021	19
5	Leão 4R4PA-06 230 (0,5 cv)	Ago/2021	10
6	Leão 4R6PB-06 230 (1 cv)	Dez/2021 – Jan/2022	28
7	Leão 4R6PB-07 370 (1,5 cv)	Dez/2020 – Mai/2021	81
8	Leão 4R6PB-09 370 (2 cv)	Jul/2021 – Set/2021	24

Fonte: Autoria própria (2023).

Os critérios de validação dos ensaios de caracterização da produção diária de água de SFB envolveram dois aspectos. O primeiro deles relacionou-se à determinação da proporção de irradiação difusa máxima (PD) no plano horizontal que um determinado dia poderia apresentar para ser incorporado como amostra do modelo de predição do volume bombeado. Já o segundo critério envolveu a especificação do número mínimo de dias de ensaio a uma dada altura manométrica para caracterização da motobomba.

Nesse sentido, considerou-se, inicialmente, que os dias ensaiados a serem incorporados ao modelo empírico deveriam apresentar uma proporção de irradiação difusa no plano horizontal menor ou igual a 25%, visto que, caso fossem considerados dias com $PD > 25\%$, os erros de predição do modelo poderiam ser maiores. Para testar essa hipótese, foram desenvolvidos também modelos que englobaram amostras com proporção de difusa de até 30% e 40%. Já o número mínimo de ensaios a uma dada altura manométrica foi de 5 dias, a fim de considerar o efeito de diferentes perfis de irradiância sobre o volume bombeado.

O passo seguinte envolveu a construção do modelo empírico de estimativa do volume

bombeado por Sistemas Fotovoltaicos de Bombeamento. Este modelo foi desenvolvido por meio do *software Rstudio*®, que utiliza a linguagem R e possui uma série de pacotes estatísticos facilmente aplicáveis. A hipótese inicial considerou que há uma relação entre o volume efetivamente bombeado, V_B , e a expressão formada pelo resultado da multiplicação entre o volume demandado e a potência do gerador fotovoltaico dividido pela potência hidráulica requerida pela motobomba, $(V_D * P_{GFV})/P_H$. A representação da relação é expressa pela Equação 3.4.

$$V_B = f \left(\frac{P_{GFV} * V_D}{P_H} \right) \quad (3.4)$$

onde:

V_B - Volume bombeado ao longo de um ciclo (m^3).

P_{GFV} - Potência nominal do gerador FV (W_p).

V_D - Volume demandado ao longo de um ciclo (m^3).

P_H - Potência hidráulica requerida pela motobomba (W).

Dentro da hipótese inicial, a variável Volume Demandado corresponde ao parâmetro de projeto que representa a quantidade de água demandada pelos usuários de uma determinada aplicação de Sistemas Fotovoltaicos de Bombeamento. Para se suprir tal demanda, é necessário que o conjunto motobomba seja capaz de suprir uma determinada vazão de projeto Q ($m^3.h^{-1}$), de maneira ininterrupta, durante um dado intervalo de tempo. Dessa forma, o número de horas equivalentes de sol diária (h) a uma intensidade de $1000 W.m^{-2}$, que é a variável HSP (Horas de Sol Pleno), corresponde justamente ao intervalo de tempo em que o Sistema Fotovoltaico de Bombeamento, hipoteticamente, opera em sua frequência nominal e, assim, fornece a vazão de projeto. Diante do exposto, o Volume Demandado foi calculado a partir da Equação 2.5 (pag. 53). A Equação 2.6 (pag. 53) foi utilizada para calcular o parâmetro HSP e, por fim, a Equação 2.3 (pag. 53) permitiu o cálculo da potência hidráulica requerida pelo conjunto motobomba para bombear a vazão de projeto a uma dada altura manométrica.

Combinando as Equações 2.3, 2.5 e 3.4, foi obtida a Equação 3.5, que expressa a relação entre os diferentes parâmetros do modelo empírico.

$$V_B = f \left(\frac{P_{GFV} * HSP}{2,725 * H_{man}} \right) \quad (3.5)$$

O pressuposto adotado foi de que a relação expressa na Equação 3.5 poderia ser modelada por meio de uma regressão linear simples. Dessa forma, o modelo empírico proposto apresentou a seguinte relação (Equação 3.6):

$$V_B = a \left(\frac{P_{GFV} * HSP}{2,725 * H_{man}} \right) + b \quad (3.6)$$

onde:

a – coeficiente angular, que mensura o nível de inclinação entre a reta de regressão e o eixo

horizontal.

b – coeficiente linear, que corresponde ao termo constante da reta de regressão ou intercepto.

A estimativa dos coeficientes de regressão a e b que melhor se ajustam aos dados coletados durante os ensaios a sol real foi feita a partir do Método dos Mínimos Quadrados Ordinários (MMQO), com o qual se obteve os coeficientes de regressão a partir da minimização da soma-tória do quadrado dos erros (diferença entre o mensurado e o predito). Inicialmente, o modelo foi construído com base em 80% das observações (dados de treino). As amostras de treino foram selecionadas aleatoriamente a partir do comando *set.seed* do pacote base do *Rstudio*®. A aplicação do MMQO foi feita com o comando *lm* do pacote *stats*.

Para que a aplicação da MMQO fosse válida, foi necessário avaliar se as suas premissas de utilização (linearidade dos parâmetros e homoscedasticidade, normalidade e independência dos erros) foram satisfeitas. O cumprimento do primeiro requisito (linearidade dos parâmetros) depende da forma funcional do modelo: os coeficientes de regressão (parâmetros a e b) devem apresentar expoentes iguais a um (1).

A verificação do atendimento às premissas de homoscedasticidade (variância constante), normalidade e independência (ausência de correlação) dos erros foi feita por meio, respectivamente, dos testes de hipótese *Breusch-Pagan*, *Shapiro-Wilk* e *Durbin-Watson*. Esses testes foram implementados por meio dos comandos *ols_test_breusch_pagan* (pacote *olsrr*), *shapiro.test* (pacote *stats*) e *dwtest* (pacote *lmtest*) presentes no *Rstudio*®. A hipótese nula, aquela que assume evidências de homoscedasticidade, normalidade e independência dos erros, ocorre em situações em que o valor-p associado ao teste é maior do que 0,05; já em casos com valor-p menor do que 0,05 (hipótese alternativa), há evidências de não atendimento aos pressupostos.

A significância estatística dos coeficientes (angular e intercepto) do modelo de regressão linear simples foi avaliada a partir do parâmetro valor-p associado ao teste t de significância para Análise de Variâncias (ANOVA) de regressão. Caso o valor-p associado ao coeficiente angular e ao intercepto seja menor do que 0,05, estes coeficientes podem ser considerados significativos, indicando que a variável independente explica, de maneira estatisticamente significativa, a variável dependente (volume diário bombeado, V_B). Esse teste foi implementado no *Rstudio*® por meio do comando *summary* do pacote base do programa.

A etapa seguinte correspondeu à avaliação do ajuste e da qualidade do modelo através de duas métricas, o Coeficiente de Determinação (R^2) e o Erro Médio Percentual Absoluto (MAPE). A primeira métrica corresponde à proporção da variância na variável dependente que é explicada pela variação na variável independente. Dessa forma, o R^2 indica a qualidade do ajuste do modelo linear simples aos dados observados. A segunda (MAPE) é uma métrica utilizada para mensurar o erro e indica a distância média em % entre os dados observados (amostras de treino) e os preditos pelo modelo. A avaliação do R^2 e do MAPE foi implementada no *Rstudio*® pelos comandos *R2_Score* e *MAPE* do pacote *MLmetrics*. O Coeficiente de Determinação (R^2)

é dado pela Equação 3.7, enquanto o MAPE é calculado por meio da Equação 3.2, descrita anteriormente.

$$R^2 = 1 - \frac{SQR}{SQT} \quad (3.7)$$

onde:

SQR – Soma dos quadrados dos resíduos.

SQT – Soma dos quadrados totais.

A penúltima etapa correspondeu à validação do modelo, que consiste em verificar se o modelo de regressão pode ser estendido para a população da qual uma amostra é originada, ou seja, se este pode ser generalizado para novas observações. Para a validação, os dados medidos relativos às 20 observações restantes (ou seja, 20% do total), que correspondem às amostras de teste, foram comparados com os valores que seriam preditos pelo modelo empírico construído com as amostras de treino. Tal comparação foi feita também a partir das métricas R^2 e MAPE. Tanto na etapa de avaliação do ajuste do modelo como na sua validação, consideraram-se as amostras (de treino e de teste, respectivamente) como valor de referência para o cálculo do MAPE.

A última etapa compreendeu a delimitação da aplicabilidade do modelo empírico desenvolvido, a qual está diretamente associada às condições de realização dos ensaios a sol real. Neste sentido, foram definidos os intervalos de irradiação no plano do gerador fotovoltaico, eficiência e potência da motobomba, potência do gerador fotovoltaico, altura manométrica, vazão e da razão entre a potência nominal real do gerador fotovoltaico (P_{GFV})⁵ e a potência da motobomba (P_{MB}). Esta razão é aqui denominada de fator de dimensionamento (FD).

⁵ Potência nominal obtida a partir dos testes de caracterização de curva I-V e P-V dos geradores fotovoltaicos.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção do trabalho estão descritos e discutidos os resultados obtidos nas diferentes etapas experimentais descritas na seção de Materiais e Métodos. O tópico 4.1 descreve e analisa os resultados dos testes de obtenção de curvas características de geradores fotovoltaicos. O tópico 4.2 discorre sobre os resultados obtidos a partir dos ensaios de caracterização das curvas características de motobombas com fonte de tensão estabilizada. Por fim, o tópico 4.3 discute os resultados obtidos nos testes de motobombas a sol real, descrevendo o modelo empírico proposto no presente trabalho e apresentando a validação do dimensionamento dos geradores fotovoltaicos utilizados nos experimentos para as diferentes potências de motobombas.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS GERADORES FOTOVOLTAICOS

A caracterização dos geradores fotovoltaicos indica se os módulos sofreram ou não degradação com relação à potência nominal de placa de cada módulo. Tal avaliação é importante, visto que, no caso do presente estudo, utiliza-se, em algumas configurações de Sistemas Fotovoltaicos de Bombeamento, módulos fotovoltaicos que já foram expostos a intempéries por um tempo prolongado.

O gerador fotovoltaico com módulos da fabricante *Isofotón* modelo ISF-60/12, utilizado nos ensaios de caracterização de motobombas de 1,5 cv e 2 cv realizados no IEE-USP, foi instalado na área externa do Laboratório de Sistemas Fotovoltaicos no segundo semestre do ano de 2009. A caracterização dos módulos da *Isofotón* foi feita, no início de 2020, por meio do equipamento PVPM 1000C-40 do fabricante PVE e os resultados obtidos estão descritos na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Resultado da caracterização dos módulos *Isofotón*, ISF – 60/12.

Fileira		A	B	C
Condições de medição	Temperatura do módulo de referência (°C)	60,1	60,7	61,1
	Irradiância ($W.m^{-2}$)	1004	1006	1006
Potência do gerador FV nas condições de operação (W_p)		940,1	951,4	944
Potência do gerador FV corrigida nas condições STC (W_p)		1108	1122,7	1116
Potência do gerador FV - dados de placa (W_p)		1200	1200	1200
Degradação (%)		7,7	6,4	7

Fonte: Autoria própria (2023).

Como pode ser observado na Tabela 4.1, o gerador fotovoltaico composto por módulos da *Isofotón* possui uma potência 7% inferior aos dados de placa. Merece destacar que este gerador tem aproximadamente 10 anos de uso. Este valor era esperado, devido a efeitos de degradação e especialmente por causa do efeito do acúmulo de sujidade dos módulos (estes módulos possuem vidro texturizado na parte frontal). Assim, a potência do gerador fotovoltaico considerada para o desenvolvimento do modelo empírico foi, para ensaios de motobombas de 1,5 cv, de 2231 W_p (o que corresponde à junção das fileiras A+B) e, para os testes de motobombas de 2 cv, tal potência foi de 3347 W_p (o que corresponde às fileiras A+B+C).

O gerador fotovoltaico com módulos da fabricante *Yingli Solar* modelo YL55P-17b, utilizado nos ensaios de caracterização de motobombas de 0,5 cv realizados na UNIFAP, foi instalado no terraço do bloco do Curso de Engenharia Elétrica em janeiro de 2017. A caracterização dos módulos da *Yingli* foi feita, em setembro de 2022, por meio do equipamento Solar IV-w do fabricante *HT Instruments* e os resultados obtidos estão descritos na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Resultado da caracterização dos módulos *Yingli Solar*, YL55P-17b.

Fileira		Valores
Condições de medição	Temperatura do módulo de referência (°C)	55,6
	Irradiância ($W.m^{-2}$)	1007
Potência do gerador FV nas condições de operação (W_p)		803,2
Potência do gerador FV corrigida nas condições STC (W_p)		893
Potência do gerador FV - dados de placa (W_p)		1045
Degradação (%)		14,5

Fonte: Autoria própria (2023).

Como pode ser observado na Tabela 4.2, o gerador fotovoltaico composto por módulos da *Yingli Solar* apresentou uma potência 14,5% inferior aos dados de placa. Este valor é acima do esperado, visto que este gerador possui 5 anos de operação e foi limpo antes da realização da caracterização I-V. Possivelmente, esses módulos já possuíam uma potência inferior à de catálogo quando novos. Assim, o valor de potência do referido gerador fotovoltaico considerado para o desenvolvimento do modelo empírico foi de 893 W_p .

Por fim, o gerador fotovoltaico com módulos da fabricante *Komaes* modelo KM-P-85, utilizado nos ensaios de caracterização de motobombas de 1 cv realizados na UNIFAP, foi instalado no fim de julho de 2021 no mesmo local onde foi instalado o gerador da *Yingli*. A caracterização das curvas I-V e P-V dos módulos da *Komaes* foi feita, em setembro de 2022, por meio do traçador de curvas Solar IV-w. Os resultados obtidos estão descritos na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Resultado da caracterização dos módulos *Komaes*, KM-P-85.

Fileira		Valores
Condições de medição	Temperatura do módulo de referência (°C)	52,8
	Irradiância (W.m^{-2})	1011
Potência do gerador FV nas condições de operação (W_p)		1451,4
Potência do gerador FV corrigida nas condições STC (W_p)		1584
Potência do gerador FV – dados de placa (W_p)		1530
Desvio em relação aos dados de placa (%)		3,5

Fonte: Autoria própria (2023).

Nota-se, na Tabela 4.3, que o gerador fotovoltaico formado por módulos da *Komaes* apresentou, mesmo após 1 ano de uso, uma potência nominal 3,5% maior do que a declarada pelo fabricante em condições nominais, o que pode ser um reflexo da tendência atual de as empresas produtoras de módulos fotovoltaicos lançarem apenas produtos com potência igual ou superior à de placa. Assim, o valor de potência do referido gerador fotovoltaico considerado para o desenvolvimento do modelo empírico foi de 1584 W_p .

4.2 CARACTERIZAÇÃO DAS CURVAS CARACTERÍSTICAS DAS MOTOBOMBAS

As curvas características descrevem graficamente o comportamento das motobombas nas mais diversas condições operacionais, isto é, desde o início do processo de bombeamento até o momento em que o motor atinge sua frequência nominal e, assim, é entregue a vazão nominal. Essas curvas características foram obtidas, primordialmente, a partir de testes com fonte de tensão estabilizada. No entanto, em função de problemas técnicos com o equipamento de fornecimento de tensão estabilizada da UNIFAP, as curvas características das motobombas das configurações 5 e 9 foram feitas utilizando o gerador fotovoltaico como fonte de corrente contínua.

Para realizar os testes em um horário com disponibilidade de potência solar suficiente para suprir todas as faixas de operação da motobomba, estes ensaios foram realizados em horários de pico da irradiância solar (meio-dia). O procedimento foi similar ao realizado com a fonte c.c.: configurou-se o conversor de frequência *Solar Drive* (utilizado como dispositivo de condicionamento de potência para compatibilizar a saída do gerador fotovoltaico e os requerimentos da motobomba) conforme a Tabela 3.16 (página 80) e pressionou-se manualmente o botão do conversor para acelerar e, depois de permanecer um curto período de tempo operando na frequência nominal, pressionou-se o botão do conversor para desacelerar a motobomba até

que a vazão de bombeio fosse igual a $0 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$.

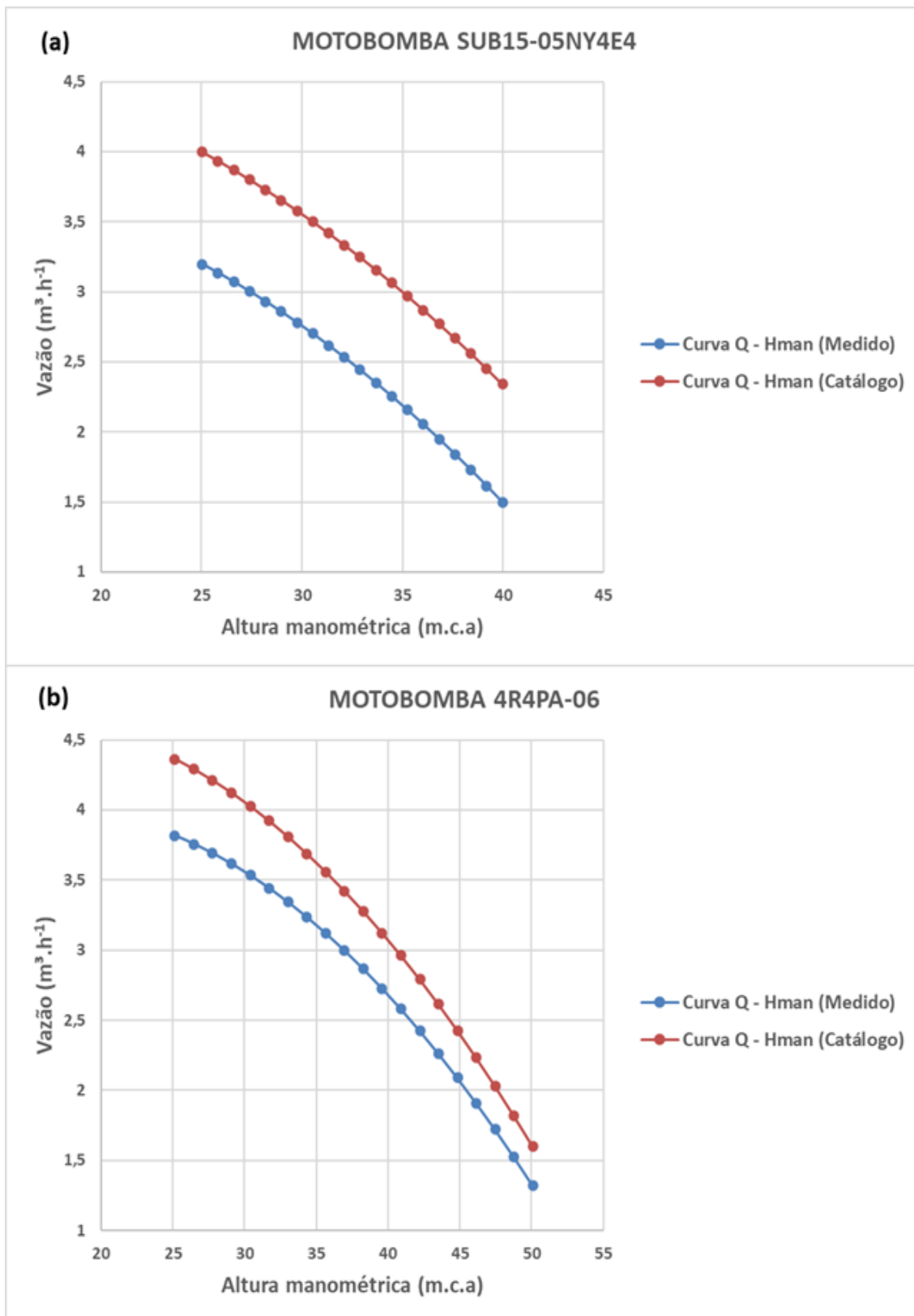
O subtópico 4.2.1 realiza uma análise comparativa entre as curvas $Q - H_{man}$ (Vazão em função da Altura Manométrica) medidas experimentalmente e as obtidas a partir dos dados de catálogo. O subtópico 4.2.2 discorre sobre a obtenção da altura manométrica de maior eficiência e a validação da altura selecionada para os ensaios a sol real. O subtópico 4.2.3 aborda os resultados obtidos em relação às curvas de $Q - P$ (Vazão em função da Potência c.c). Por fim, o subtópico 4.2.4 compara as curvas $Q - H_{man}$ da motobomba padrão de teste em diferentes bancadas laboratoriais.

4.2.1 Comparação das curvas Vazão em função da Altura Manométrica medidas e de catálogo

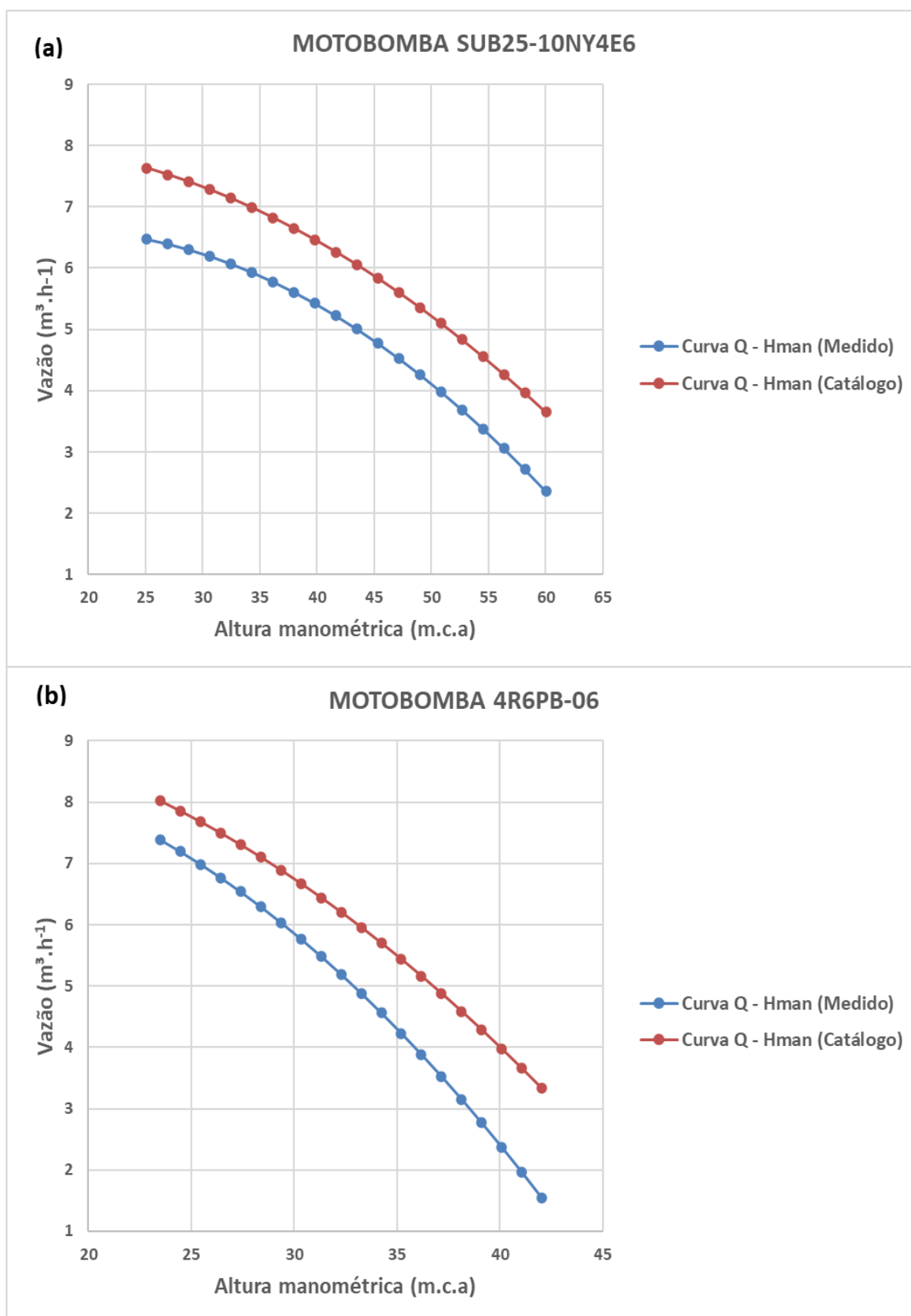
A partir da realização dos testes com fonte c.c., determinou-se a vazão nominal fornecida pelas motobombas em diferentes alturas manométricas, conforme descrito na Tabela 3.15 (página 80). Com base nesses dados experimentais, foram desenvolvidas as curvas de Vazão em função da Altura Manométrica ($Q - H_{man}$) para cada uma das motobombas das configurações (1) a (8) da Tabela 3.1 (página 61). Para investigar a hipótese de que os resultados obtidos em condições reais são divergentes em relação aos descritos pelos fabricantes em seus catálogos, realizou-se uma análise comparativa entre as curvas feitas com dados medidos e as determinadas a partir dos dados dos fabricantes.

Os gráficos da Figura 4.1 (a) e (b) correspondem, respectivamente, às curvas $Q - H_{man}$ das motobombas de 0,5 cv; os gráficos da Figura 4.2 (a) e (b) representam as curvas das motobombas de 1 cv; os gráficos da Figura 4.3 (a) e (b), as curvas das motobombas de 1,5 cv e, por fim, os gráficos da Figura 4.4 (a) e (b) demonstram as curvas das motobombas de 2 cv. Os gráficos (a) apresentam motobombas da Schneider e os (b), das motobombas Leão. As curvas de cor laranja foram obtidas a partir de ensaios com fonte c.c. e as de cor amarela, a partir de dados de catálogo do fabricante.

Figura 4.1 – Curva da Vazão ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$) em função da Altura Manométrica (m.c.a.): (a) Schneider 0,5 cv; (b) Leão 0,5 cv.

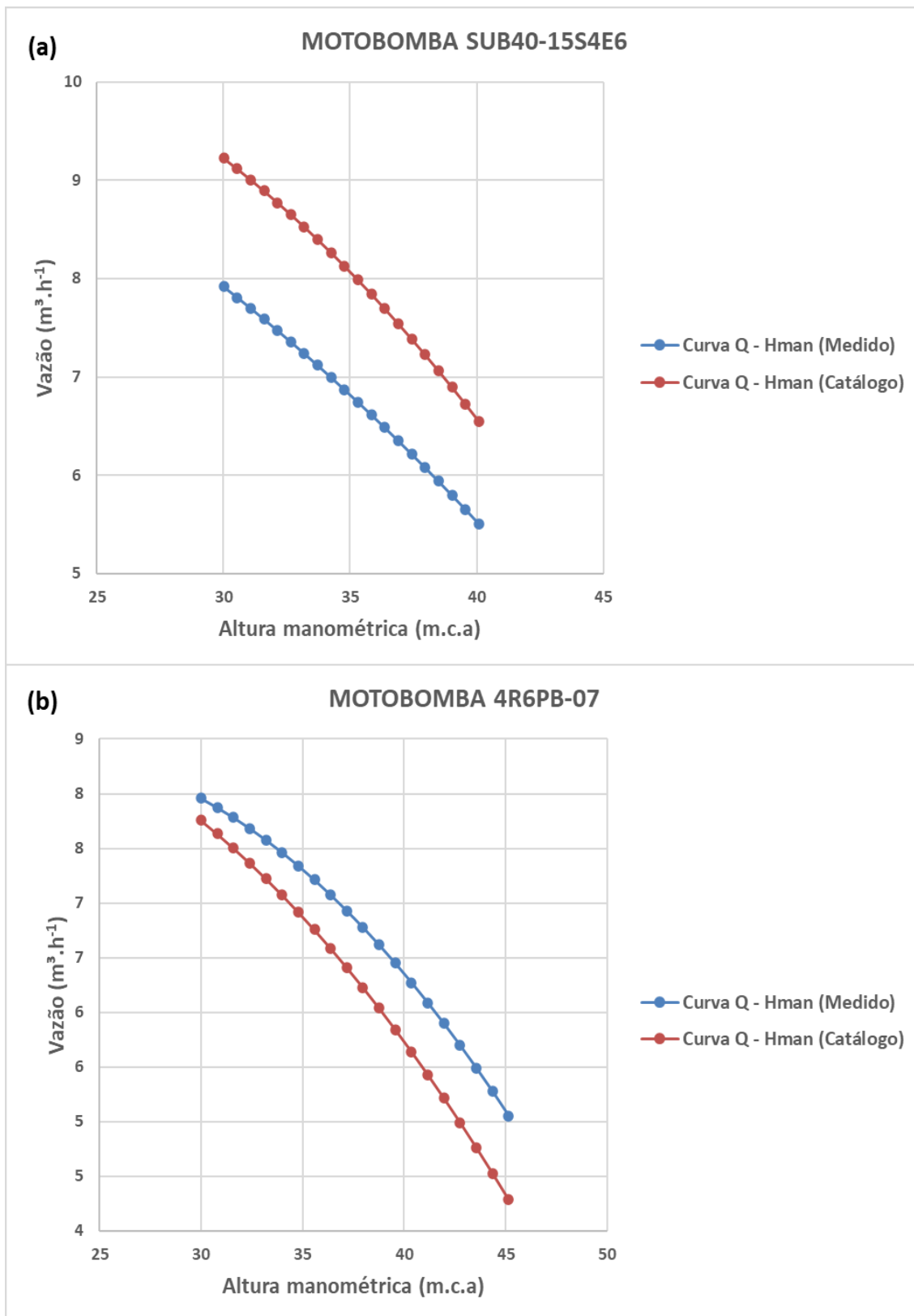


Fonte: Autoria própria (2023).

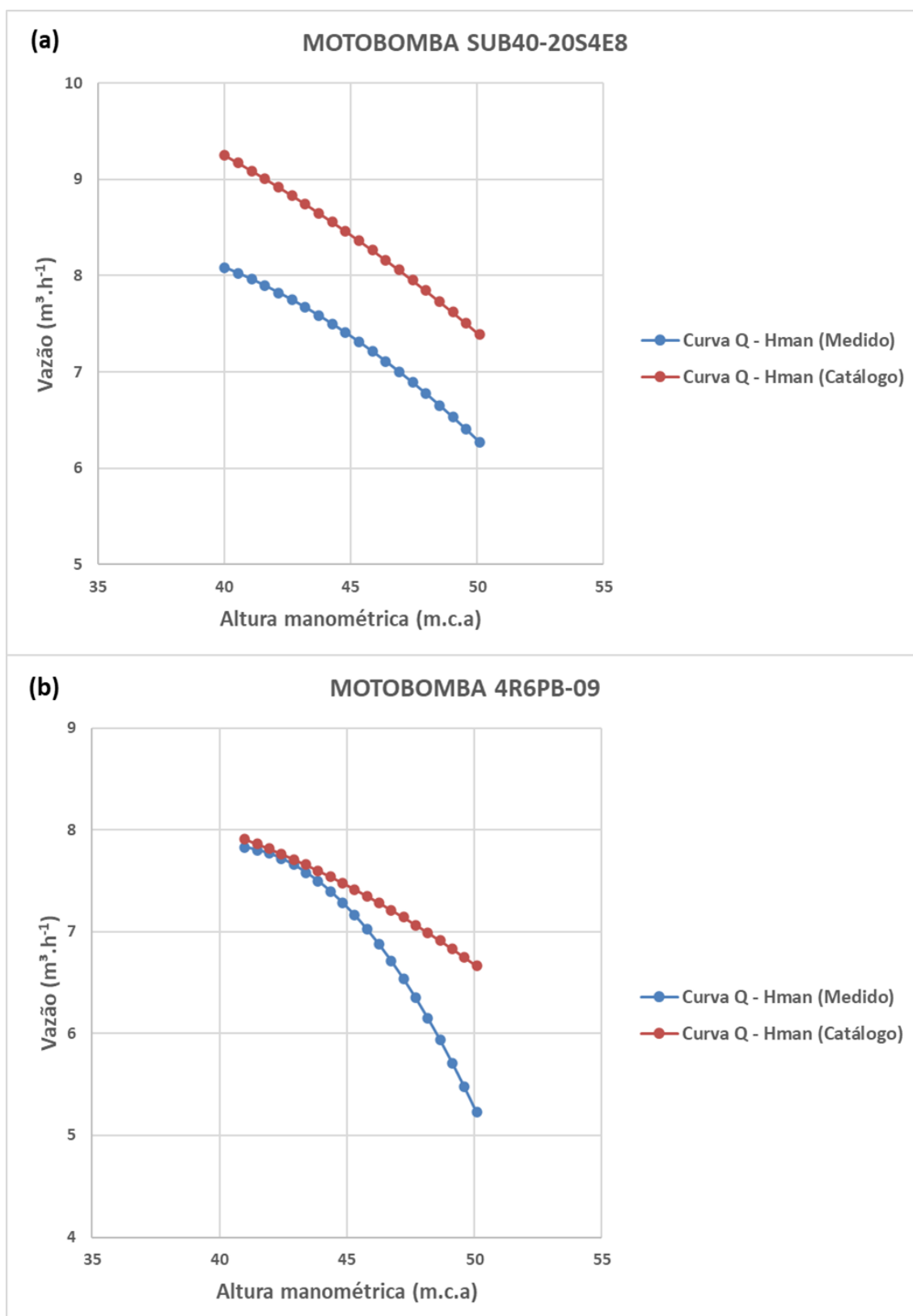
Figura 4.2 – Curva da Vazão ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$) em função da Altura Manométrica (m.c.a.): (a) Schneider 1 cv; (b) Leão 1 cv.

Fonte: Autoria própria (2023).

Figura 4.3 – Curva da Vazão ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$) em função da Altura Manométrica (m.c.a.): (a) Schneider 1,5 cv; (b) Leão 1,5 cv.



Fonte: Autoria própria (2023).

Figura 4.4 – Curva da Vazão ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$) em função da Altura Manométrica (m.c.a.): (a) Schneider 2 cv; (b) Leão 2 cv.

Fonte: Autoria própria (2023).

Observando-se os gráficos das Figuras 4.1, 4.2, 4.3 e 4.4, algumas informações importantes podem ser extraídas. Primeiramente, nota-se que os valores de vazão mensurados nos ensaios de caracterização de motobombas foram maiores do que as vazões indicadas nos manuais dos fabricantes para uma mesma altura manométrica apenas para o caso da motobomba Leão de 1,5 cv (configuração 7 da Tabela 3.1, página 61). O Erro Médio Percentual Absoluto (MAPE), para essa motobomba, foi de 8,2%.

Por outro lado, para todas as outras sete motobombas, as vazões de catálogo foram superiores às encontradas experimentalmente para todas as alturas manométricas. Por exemplo, para a motobomba Schneider de 0,5 cv (configuração 1 da Tabela 3.1), o desvio médio obtido foi de 35,1%, sendo este o maior valor de MAPE observado entre todas as configurações. O menor valor de MAPE para os casos em que os dados de catálogo superaram os medidos nos testes de caracterização de motobombas foi de 7,7% e ocorreu para o equipamento Leão de 2 cv (configuração 8 da Tabela 3.1).

No entanto, ao se analisar o valor do Erro Máximo Percentual Absoluto (EMPA), que corresponde ao desvio máximo entre as vazões medidas experimentalmente e as vazões preditas (dados de catálogo), nota-se que, para algumas motobombas, há pontos em que essa diferença atinge mais de 50%. Para a motobomba Schneider de 0,5 cv (configuração 1 da Tabela 3.1), o EMPA chega a 56,2%; para a Schneider de 1 cv (configuração 2 da Tabela 3.1), o desvio máximo atinge 54,7% e, para a Leão de 1 cv, o EMPA ultrapassa 115%.

Todos esses resultados demonstram que há uma divergência entre os dados de catálogo e aqueles obtidos nos ensaios de motobombas em bancadas laboratoriais.

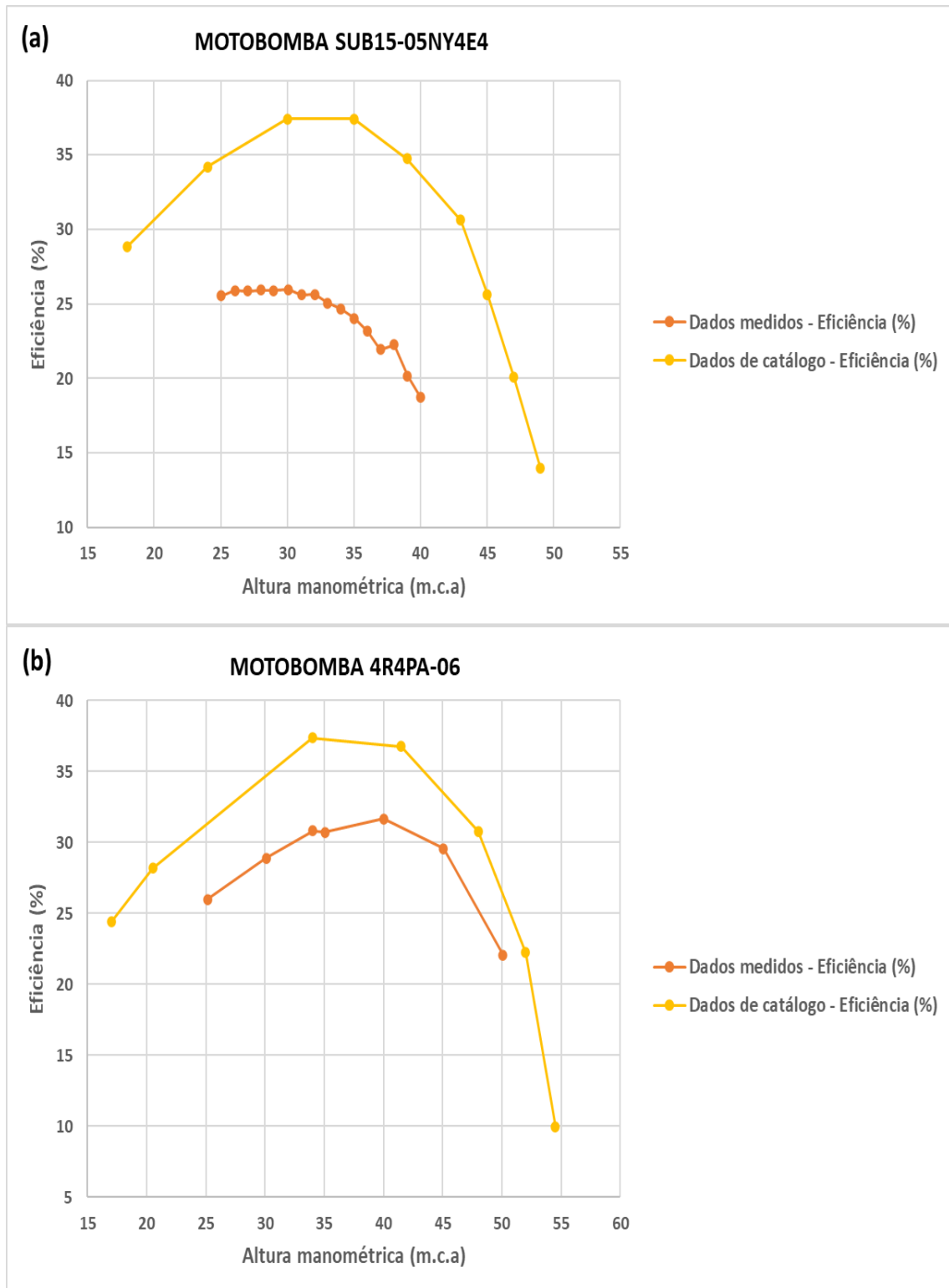
4.2.2 Determinação da altura manométrica (m.c.a.) de maior eficiência das motobombas e validação da altura selecionada para os ensaios a sol real

A partir dos testes com fonte c.c. foi possível, também, mensurar a eficiência de cada uma das motobombas em diferentes pressões, conforme descrito na Tabela 3.15 (página 80). Dessa forma, foram obtidas as curvas de Eficiência em função Altura Manométrica ($E_{ff} - H_{man}$) para cada uma das motobombas das configurações (1) a (8) da Tabela 3.1 (página 61). Tais curvas foram comparadas com aquelas obtidas a partir do catálogo do fabricante, permitindo a determinação da região de maior eficiência de cada uma das motobombas. Dessa forma, validou-se a altura manométrica a ser utilizada para realização dos testes a sol real para as diferentes configurações de motobombas.

Os gráficos da Figura 4.5 (a) e (b) correspondem, respectivamente, às curvas $E_{ff} - H_{man}$ das motobombas de 0,5 cv; os gráficos da Figura 4.6 (a) e (b) representam as curvas das motobombas de 1 cv; os gráficos da Figura 4.7 (a) e (b), as curvas das motobombas de 1,5 cv e, por fim, os gráficos da Figura 4.8 (a) e (b) apresentam as curvas das motobombas de 2 cv. Os gráficos (a) apresentam motobombas da Schneider e os (b), das motobombas Leão. As curvas

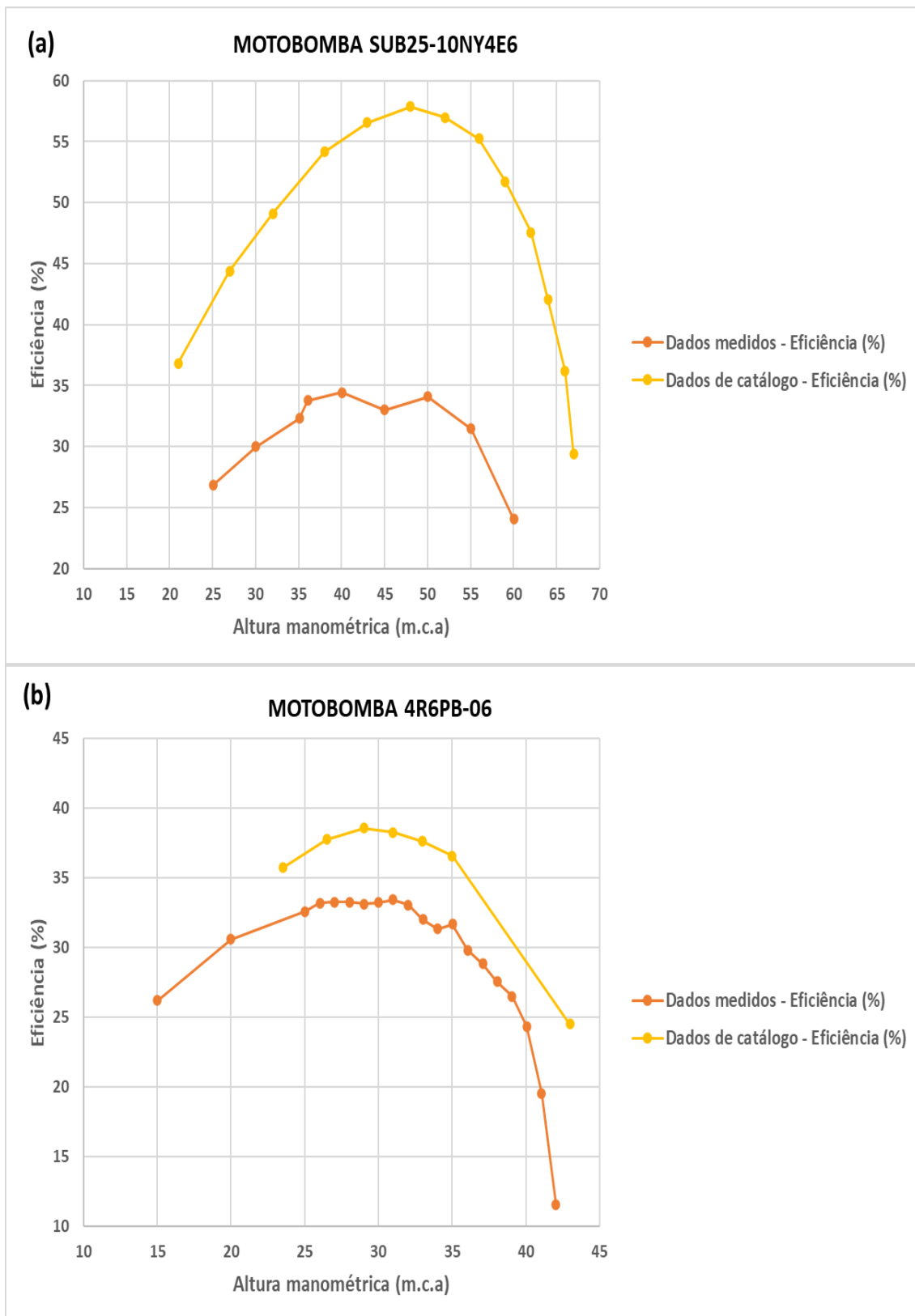
de cor laranja foram obtidas a partir de ensaios com fonte c.c. e as de cor amarela, a partir de dados de catálogo do fabricante.

Figura 4.5 – Curva da Eficiência em função da Altura Manométrica (m.c.a.): (a) Schneider 0,5 cv; (b) Leão 0,5 cv.



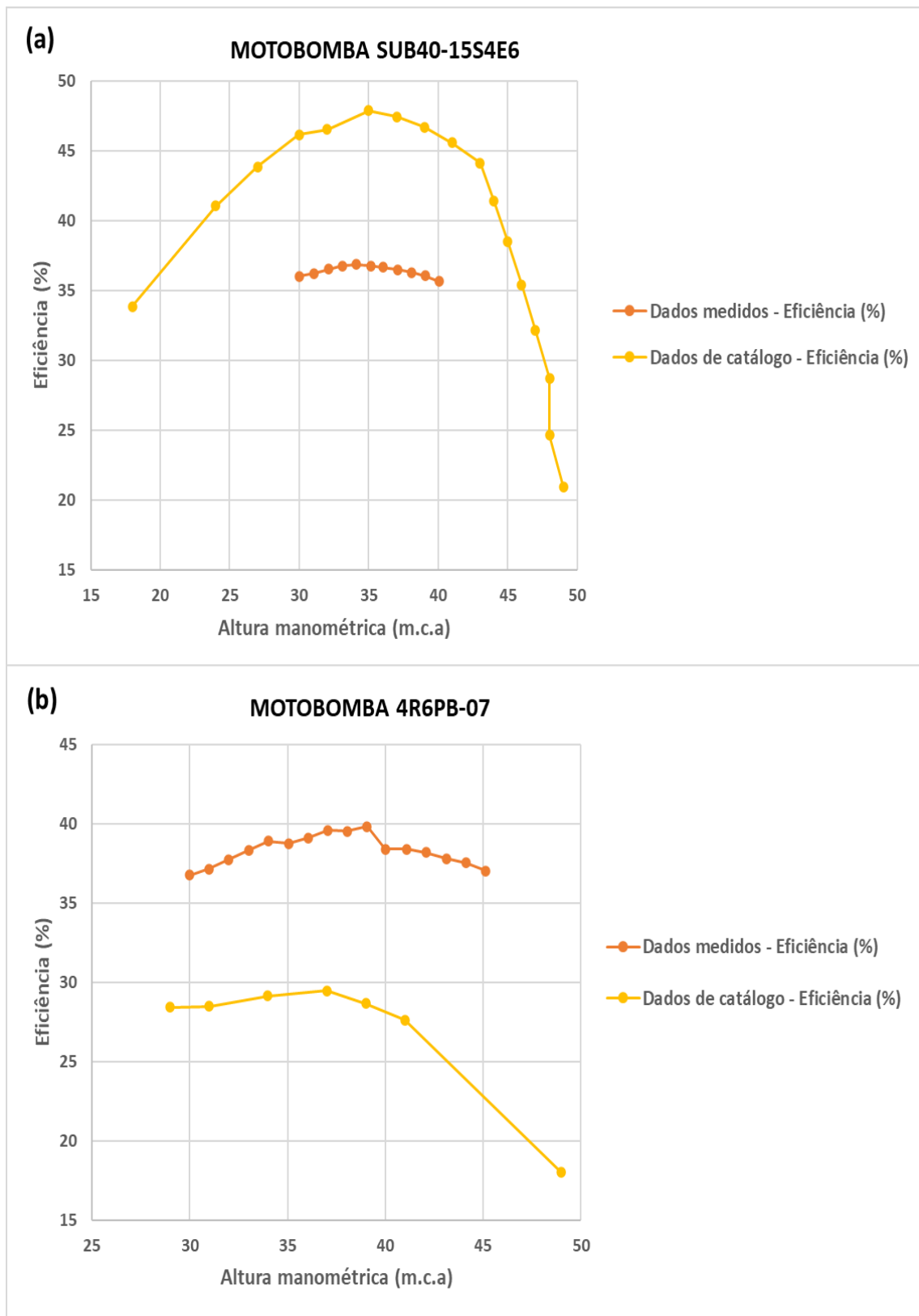
Fonte: Autoria própria (2023).

Figura 4.6 – Curva da Eficiência em função da Altura Manométrica (m.c.a.): (a) Schneider 1 cv; (b) Leão 1 cv.



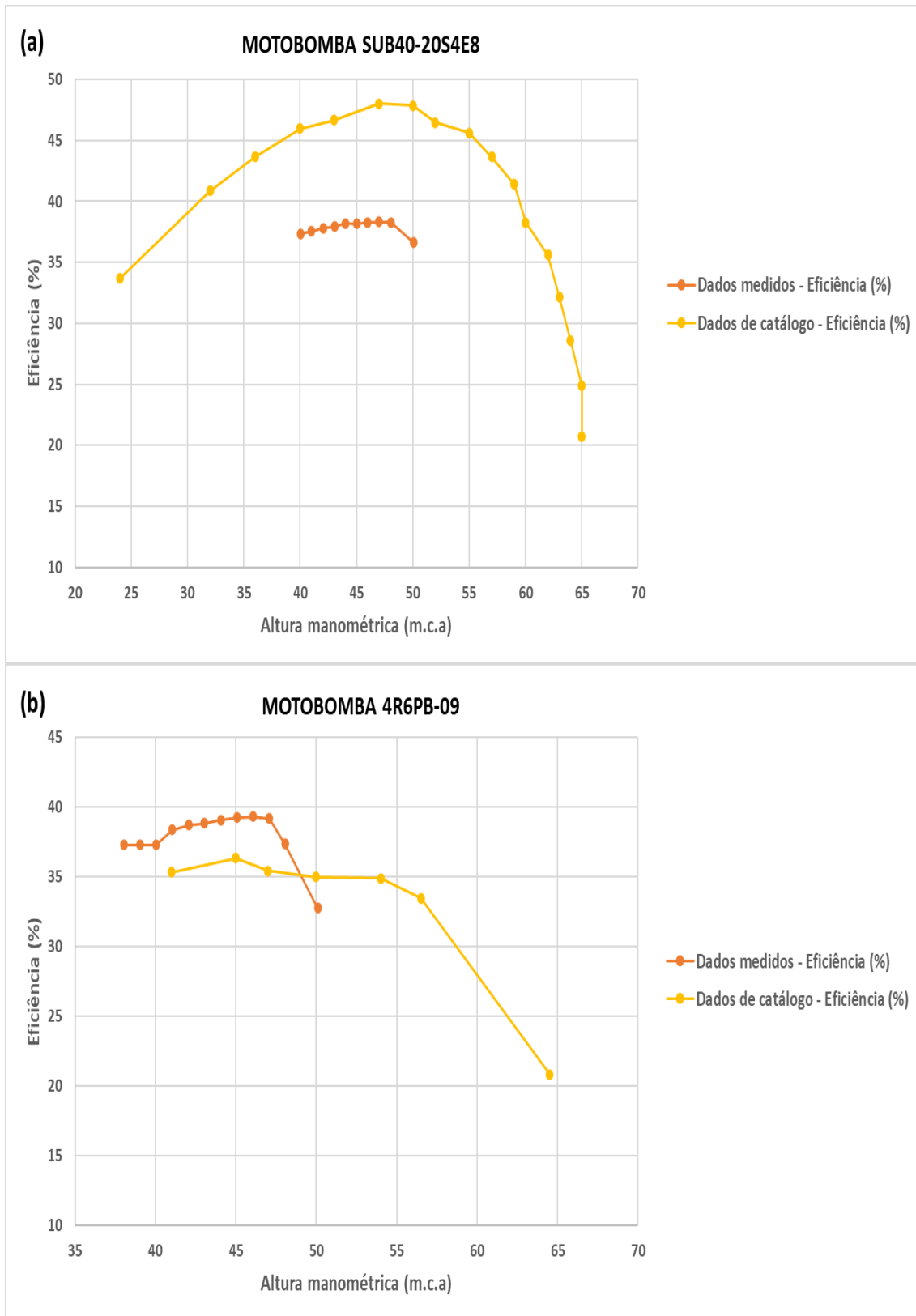
Fonte: Autoria própria (2023).

Figura 4.7 – Curva da Eficiência em função da Altura Manométrica (m.c.a.): (a) Schneider 1,5 cv; (b) Leão 1,5 cv.



Fonte: Autoria própria (2023).

Figura 4.8 – Curva da Eficiência em função da Altura Manométrica (m.c.a.): (a) Schneider 2 cv; (b) Leão 2 cv.



Fonte: Autoria própria (2023).

A partir dos gráficos apresentados nas Figuras 4.5, 4.6, 4.7 e 4.8, algumas informações relativas ao comportamento das motobombas podem ser evidenciadas. Para as quatro motobombas da fabricante Schneider (configurações 1 a 4 da Tabela 3.3), os valores de eficiência obtidos a partir das medições foram menores do que os calculados a partir dos dados do fabricante para todas as alturas manométricas. A menor diferença ocorreu para a motobomba de 2 cv, cuja maior eficiência medida foi de 38,3% e a maior calculada, 48%, o que indica uma diferença de 9,7 pontos percentuais (p.p.). Por outro lado, a maior diferença foi observada para a motobomba de 1 cv, cuja maior eficiência medida foi de 34,4% e a maior calculada, 57,9%, correspondendo a uma diferença de 23,5 pontos percentuais.

Em relação às motobombas Leão, observa-se que, para as motobombas de 0,5 cv e de 1 cv (configurações 5 e 6 da Tabela 3.3), os dados de eficiência obtidos nos testes com a fonte c.c. são menores do que aqueles calculados a partir das informações dos fabricantes. Para a motobomba de 0,5 cv, a diferença entre a maior eficiência medida (31,6%) e a maior calculada a partir das informações de catálogo do fabricante (37,4%) é de 5,8 p.p. Já para a motobomba de 1 cv, a diferença entre a maior eficiência medida (33,5%) e a maior calculada a partir dos dados contidos nos manuais técnicos (38,6%) é de 5,1 p.p. Para as motobombas de 1,5 cv e de 2 cv (configurações 7 e 8 da Tabela 3.3), as eficiências obtidas experimentalmente foram maiores do que as calculadas a partir de dados de catálogo para praticamente todas as alturas manométricas. A maior diferença foi verificada para a motobomba de 1,5 cv, cuja maior eficiência medida foi 39,8% e maior calculada foi de 29,5%, correspondendo a uma diferença de 10,3 pontos percentuais.

De maneira geral, as maiores eficiências obtidas experimentalmente para as motobombas de menor potência (0,5 e 1 cv) são menores do que aquelas medidas para as motobombas de maior potência (1,5 e 2 cv). No primeiro caso, as maiores eficiências variam entre 26,0 e 34,4%; no segundo, os maiores rendimentos estão entre 36,9 e 39,8%.

As alturas manométricas escolhidas para os ensaios a sol estão, de fato, na região de maior eficiência de cada uma das motobombas, conforme descrito na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Comparação entre as alturas de maior eficiência (calculada a partir de catálogo, medida com fonte c.c. e utilizada nos ensaios a sol real).

Configuração	Motobomba testada	Altura manométrica de maior eficiência (Calculada a partir de dados de catálogo)	Altura manométrica de maior eficiência (Medido)	Altura manométrica de ensaio a sol real
1	Schneider SUB15 -05NY4E4 (0,5cv)	30 m.c.a.	30 m.c.a.	30 m.c.a.
2	Schneider SUB25-10NY4E6 (1 cv)	48 m.c.a.	40 m.c.a.	48 m.c.a.
3	Schneider SUB40-15S4E6 (1,5 cv)	35 m.c.a.	34 m.c.a.	35 m.c.a.
4	Schneider SUB40-20S4E8 (2 cv)	47 m.c.a.	47 m.c.a.	45 m.c.a.
5	Leão 4R4PA-06 230 (0,5 cv)	34 m.c.a.	40 m.c.a.	34 m.c.a.
6	Leão 4R6PB-06 230 (1 cv)	29 m.c.a.	31 m.c.a.	29 m.c.a.
7	Leão 4R6PB-07 370 (1,5 cv)	37 m.c.a.	39 m.c.a.	35 m.c.a.
8	Leão 4R6PB-09 370 (2 cv)	45 m.c.a.	46 m.c.a.	45 m.c.a.

Fonte: Autoria própria (2023).

Na Tabela 4.4, pode-se observar que as alturas manométricas em que se realizaram os ensaios a sol real foram, para praticamente todas as configurações, aquelas indicadas no catálogo técnico do fabricante como sendo a altura de maior eficiência. No entanto, há casos em que há uma maior diferença entre a altura manométrica utilizada nos testes a sol real e a altura manométrica de maior eficiência (a uma frequência nominal) indicada pelos testes de caracterização de motobombas, como a que acontece para as configurações 2 (diferença de 8 m.c.a.), 5 (diferença de 6 m.c.a.) e 7 (diferença de 4 m.c.a.); A Tabela 4.5 apresenta a diferença entre os valores de eficiência mensurados nos ensaios de caracterização de motobomba na altura de maior eficiência e aqueles medidos para a altura selecionada para os ensaios a sol real para as configurações 2, 5 e 7.

Tabela 4.5 – Comparação das eficiências medidas para altura manométrica de maior eficiência e para altura manométrica empregada nos ensaios a sol.

Configuração	Motobomba testada	Eficiência medida para altura manométrica de maior eficiência (%)	Eficiência medida para altura manométrica utilizada nos ensaios a sol real (%)	Diferença em pontos percentuais (p.p.)
2	Schneider SUB25-10NY4E6 (1 cv)	34,42	33,63	0,79
5	Leão 4R4PA-06 230 (0,5 cv)	31,65	30,82	0,83
7	Leão 4R6PB-07 370 (1,5 cv)	39,83	38,75	1,08

Nota: Dado destacado em **negrito** foi obtido a partir de interpolação e não experimentalmente.

Fonte: Autoria própria (2023).

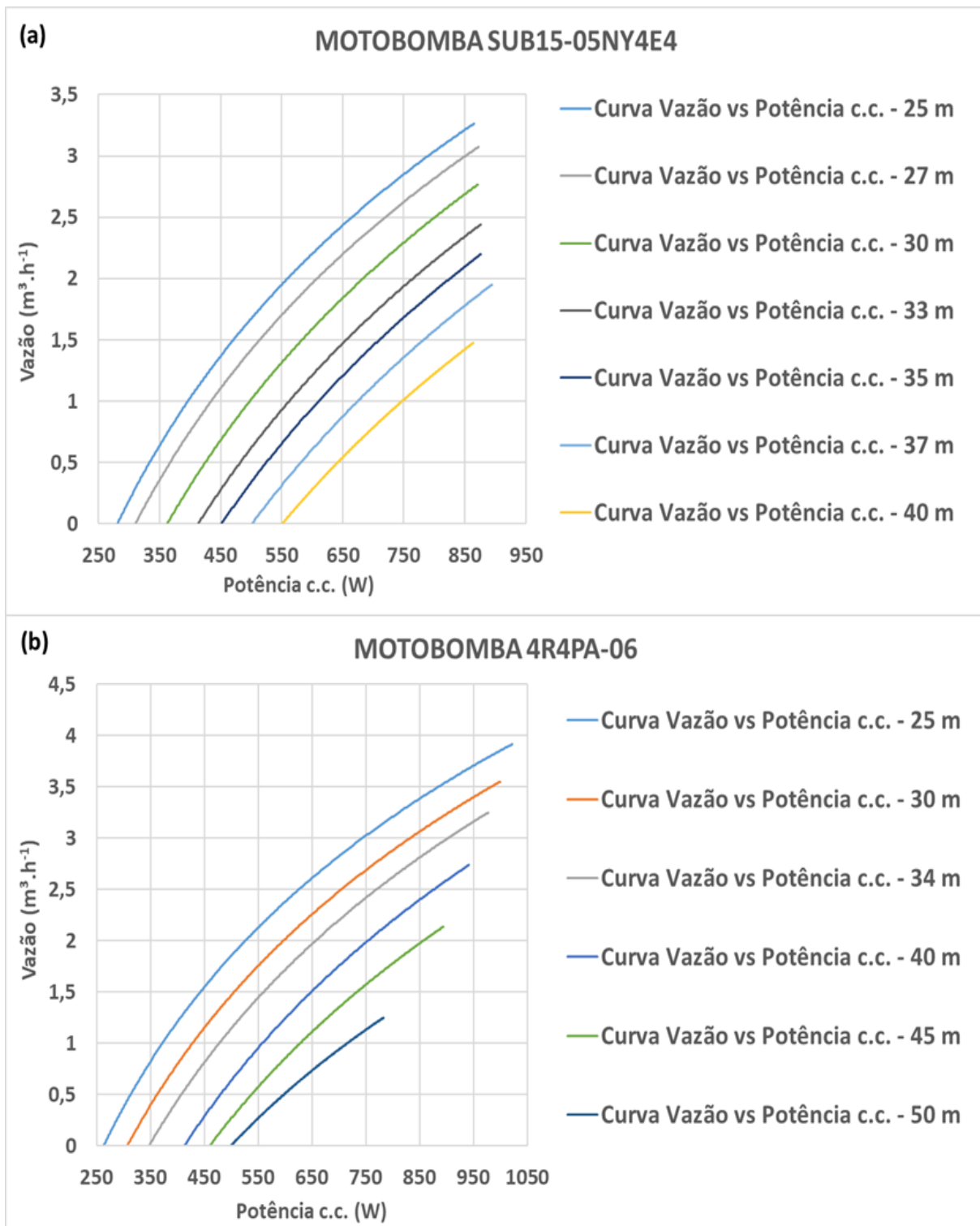
De acordo com a Tabela 4.5, a altura manométrica de maior eficiência indicada nos catálogos das motobombas pode ser tomada como referência para seleção da altura manométrica a ser adotada no processo de dimensionamento de Sistemas Fotovoltaicos de Bombeamento, pois a diferença entre a eficiência medida para a altura manométrica de maior eficiência nos ensaios de caracterização de bombas e a eficiência medida para a altura utilizada nos ensaios a sol real é de, no máximo, pouco maior que 1 ponto percentual.

4.2.3 Obtenção das curvas de Vazão em função da Potência c.c.

No processo de dimensionamento de Sistemas Fotovoltaicos de Bombeamento, é importante garantir que o gerador fotovoltaico forneça potência suficiente para que a motobomba opere em diferentes condições de irradiância e, conseqüentemente, em diferentes frequências de rotação de seu motor. Para tal, é essencial a determinação tanto da potência mínima necessária para o início do processo de bombeamento como a potência mínima demandada para que o motor opere em sua frequência nominal.

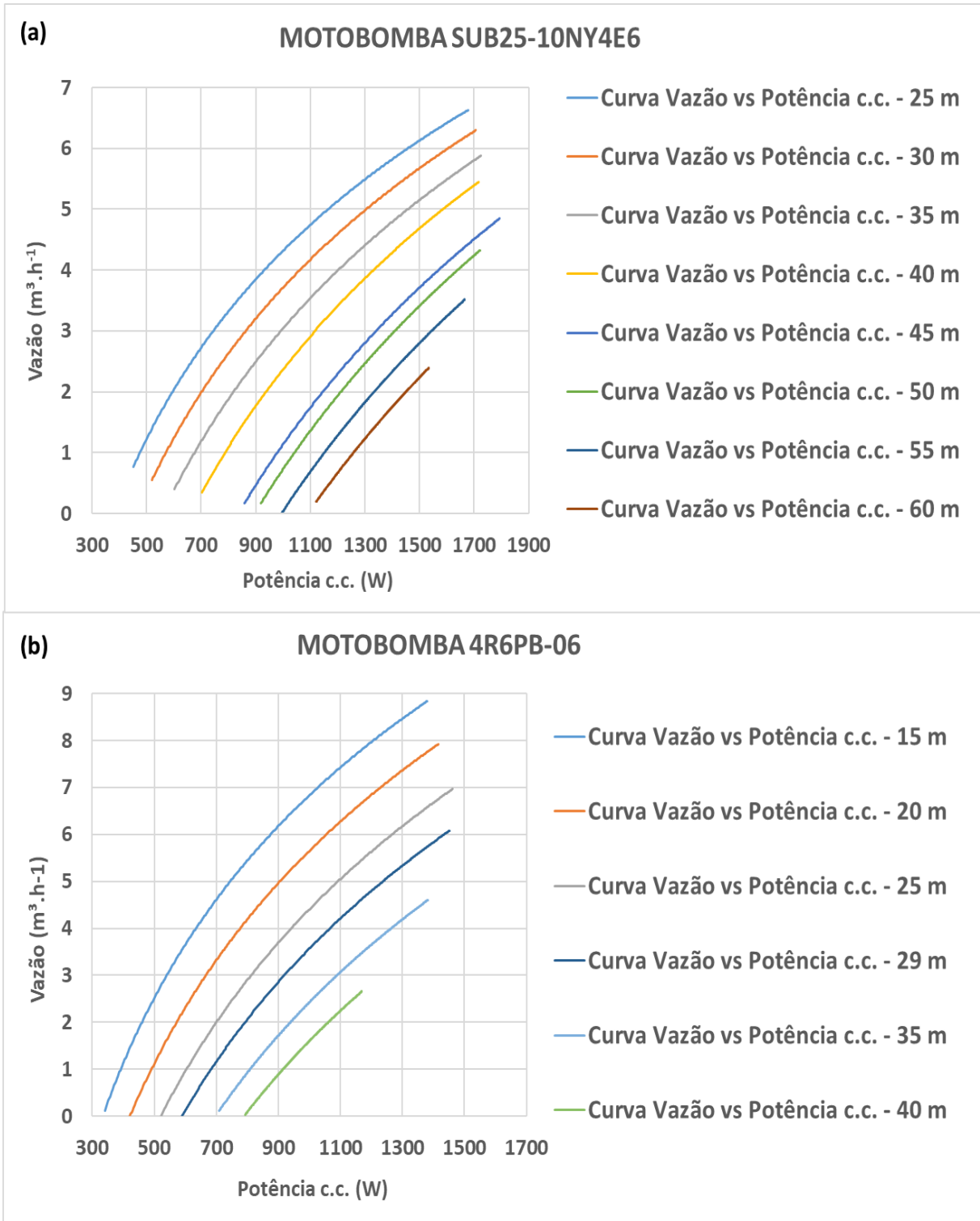
Os gráficos da Figura 4.9 (a) e (b) correspondem, respectivamente, às curvas de Vazão em função da Potência c.c. para diferentes alturas manométricas relacionadas às motobombas de 0,5 cv; os gráficos da Figura 4.10 (a) e (b) representam as curvas das motobombas de 1 cv; os gráficos da Figura 4.11 (a) e (b), as curvas das motobombas de 1,5 cv e, por fim, os gráficos da Figura 4.12 (a) e (b) retratam as curvas das motobombas de 2 cv. Os gráficos (a) apresentam motobombas da Schneider e os (b), das motobombas Leão. Por questão de melhor visualização dos gráficos, nem todas as alturas manométricas ensaiadas foram apresentadas.

Figura 4.9 – Curva da Vazão ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$) em função da Potência em Corrente Contínua (W) para diferentes Alturas Manométricas (m.c.a.): (a) Schneider 0,5 cv; (b) Leão 0,5 cv.



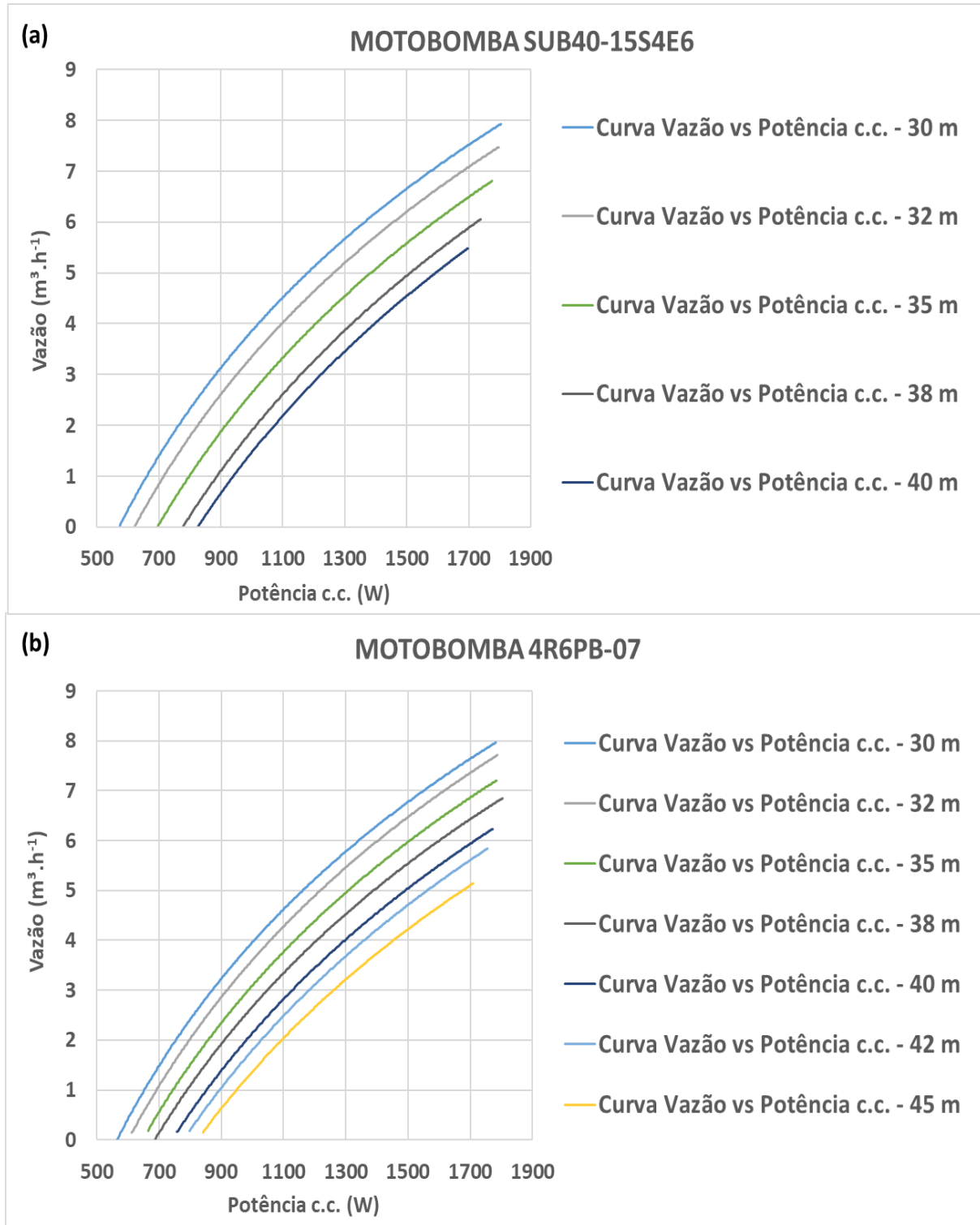
Fonte: Autoria própria (2023).

Figura 4.10 – Curva da Vazão ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$) em função da Potência em Corrente Contínua (W) para diferentes Alturas Manométricas (m.c.a.): (a) Schneider 1 cv; (b) Leão 1 cv.

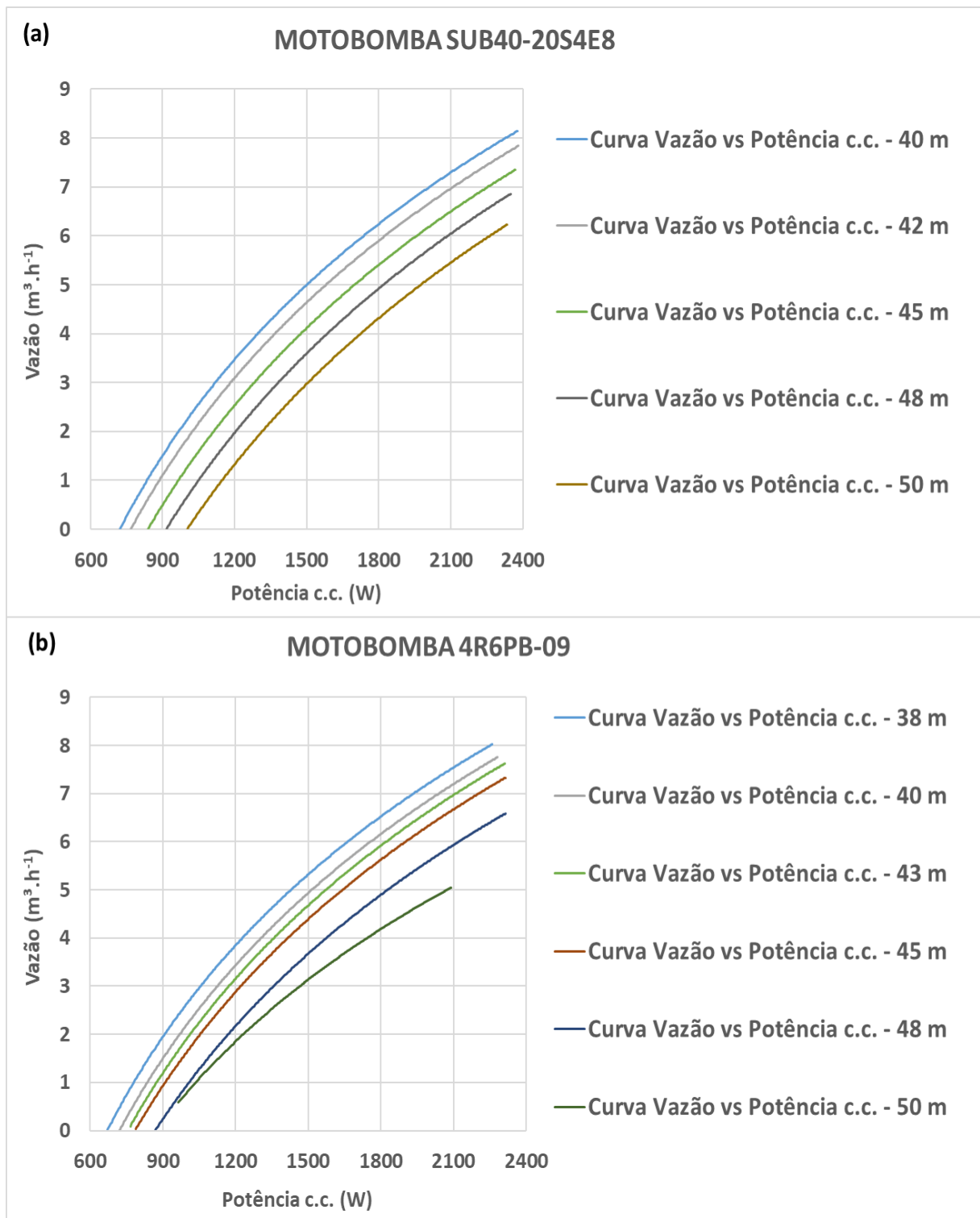


Fonte: Autoria própria (2023).

Figura 4.11 – Curva da Vazão ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$) em função da Potência em Corrente Contínua (W) para diferentes Alturas Manométricas (m.c.a.): (a) Schneider 1,5 cv; (b) Leão 1,5 cv.



Fonte: Autoria própria (2023).

Figura 4.12 – Curva da Vazão ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$) em função da Potência em Corrente Contínua (W) para diferentes Alturas Manométricas (m.c.a.): (a) Schneider 2 cv; (b) Leão 2 cv.

Fonte: Autoria própria (2023).

De acordo com a Figura 4.9, para as motobombas de 0,5 cv, as potências mínimas requeridas para o início do processo de bombeamento para a altura de maior eficiência foram de 444 W, para a motobomba Schneider a 30 m.c.a., e de 391 W para a motobomba Leão a 34 m.c.a.. Já os valores de potência mínima requerida para que as motobombas operem à frequência nominal na altura de maior eficiência são de 864 W para o equipamento da Schneider e de 969 W, para o da Leão.

Conforme verificado na Figura 4.10, para que as motobombas de 1 cv iniciem seu ciclo de bombeamento na altura manométrica de maior eficiência, são requeridas potências mínimas de **975 W (motobomba Schneider a 48 m.c.a.)**⁶ e de 661 W (motobomba Leão a 29 m.c.a.). Complementarmente, as potências mínimas que devem ser fornecidas para que as motobombas operem a 60 Hz na altura de maior eficiência correspondem a **1734 W (equipamento Schneider)** e 1434 W (equipamento Leão).

Para que as motobombas de 1,5 cv, cujas curvas de Vazão em função da Potência estão representadas na Figura 4.11, comecem a realizar o processo de bombeamento na altura manométrica de maior eficiência (35 m.c.a.), as potências mínimas demandadas são de 771 W (motobomba Schneider) e 714 W (motobomba Leão). Adicionalmente, as potências mínimas necessárias para que as motobombas operem em sua frequência nominal na altura de maior eficiência são de 1766 W (equipamento Schneider) e de 1780 W (equipamento Leão).

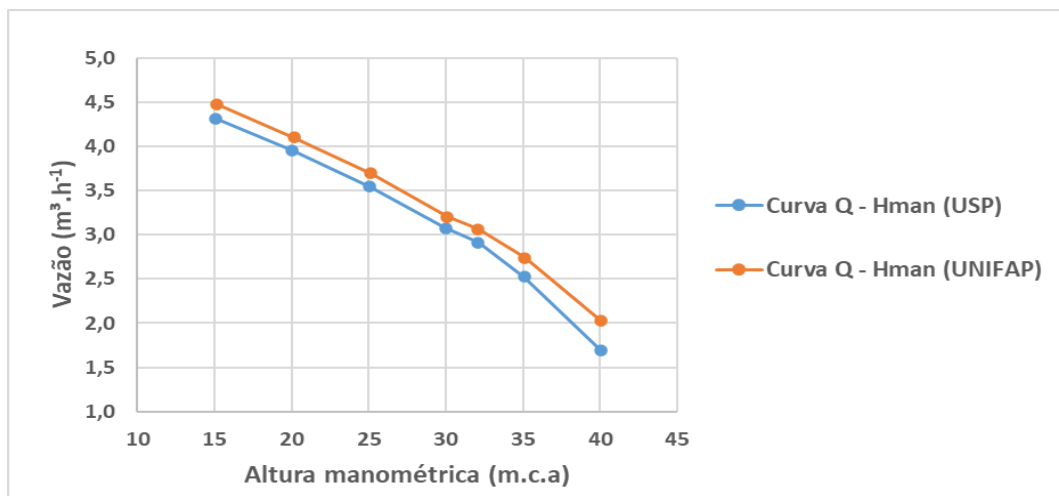
Por fim, de acordo com a Figura 4.12, para que as motobombas de 2 cv iniciem o bombeamento de água na altura manométrica de maior eficiência (45 m.c.a.), são requeridas potências mínimas de 910 W (motomba Schneider) e 932 W (motobomba Leão). Ademais, as potências mínimas que as motobombas exigem para que operem a 60 Hz na altura manométrica de maior eficiência são de 2360 W (equipamento Schneider) e 2265 W (equipamento Leão).

4.2.4 Comparação das curvas de Vazão em função da Altura Manométrica da motobomba padrão de teste obtidas em diferentes bancadas

Com o objetivo de demonstrar a reprodutibilidade dos resultados obtidos nos testes de caracterização de motobombas em diferentes bancadas laboratoriais, uma motobomba padrão de 0,5 cv (configuração 9 da Tabela 3.1 da página 61) foi ensaiada tanto no laboratório da USP como no da UNIFAP. A Figura 4.13 apresenta as curvas de Vazão em função da Altura Manométrica obtidas para a motobomba padrão em ambas as universidades.

⁶ Dados destacados em negrito foram obtidos a partir de interpolação e não experimentalmente.

Figura 4.13 – Curva da Vazão ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$) em função da Altura Manométrica (m.c.a.) para a motobomba padrão de teste obtidas nas bancadas da USP e da UNIFAP.



Fonte: Autoria própria (2023).

Ao se comparar as curvas representadas na Figura 4.13, o Erro Médio Percentual Absoluto (MAPE) encontrado foi de 7,02%. Essa diferença está associada com as incertezas dos instrumentos de medição e de transmissão de dados. Os medidores de vazão (modelo SITRANS FM MAGFLO MAG 5000 da fabricante *Siemens*) e os *dataloggers* (modelo HP-34970A da *Agilent*) utilizados em ambas as universidades foram adquiridos há mais de 15 anos e, por estarem um longo período em operação, podem ter sofrido desgastes que aumentam o nível de incerteza desses equipamentos. A partir do MAPE observado e das considerações feitas, não é possível afirmar que os resultados dos ensaios de caracterização da motobomba padrão em ambas as universidades são diferentes entre si. Assim, considera-se que os ensaios de caracterização são reprodutíveis nas diferentes bancadas.

4.3 CARACTERIZAÇÃO DOS ENSAIOS DE MOTOBOMBAS A SOL REAL

Conforme descrito no tópico 3.7 da seção de Materiais e Métodos, os ensaios a sol real foram realizados a fim de determinar o volume bombeado de água por motobombas em diferentes condições de irradiação, potências de gerador fotovoltaico e alturas manométricas e em dias com distintas proporções de irradiação difusa (PD). Além disso, os ensaios a sol real permitiram também avaliar se os geradores fotovoltaicos escolhidos previamente forneciam energia suficiente para a motobomba atingir seu patamar máximo de vazão, a partir da análise das curvas $Q - I_g$ (Vazão em função da Irradiância).

Os subtópicos 4.3.1 e 4.3.2 abordam, respectivamente, os resultados relativos ao modelo empírico e à validação do dimensionamento dos geradores fotovoltaicos por meio das curvas $Q - I_g$.

4.3.1 Desenvolvimento do Modelo Empírico de Estimativa do Volume Bombeado

A Tabela 4.6 apresenta algumas informações sobre os ensaios para avaliação do volume de água bombeado pelos diferentes Sistemas Fotovoltaicos de Bombeamento.

Tabela 4.6 – Descrição dos ensaios a sol real realizados para as diferentes configurações de Sistema Fotovoltaico de Bombeamento.

Potência da motobomba (cv)	Período de realização dos experimentos	Número de dias de ensaios feitos na altura manométrica de maior eficiência	Número de dias de ensaio com $PD \leq 25\%$ na altura manométrica de maior eficiência	Número de dias de ensaios com $PD \leq 30\%$ na altura manométrica de maior eficiência	Número de amostras com $PD \leq 40\%$ na altura manométrica de maior eficiência
Schneider 0,5 cv	Jun/2021-Dez/2022	11	5	5	5
Leão 0,5 cv	Ago/2021	10	8	9	10
Schneider 1 cv	Out/2021-Nov/2021	28	7	9	10
Leão 1 cv	Dez/2021-Jan/2022	28	5	8	12
Schneider 1,5 cv	Mai/2021-Jul/2021	27	15	20	25
Leão 1,5 cv	Dez/2020-Mai/2021	81	31	43	68
Schneider 2 cv	Jul/2021	19	15	17	18
Leão 2 cv	Jul/2021-Set/2021	24	13	13	21

Fonte: Autoria própria (2023).

Segundo a Tabela 4.6, o número de dias de ensaio na altura manométrica de maior eficiência, considerando todas as motobombas, chegou a 228 dias, sendo 77 observações coletadas na UNIFAP e 151 amostras coletadas na USP.

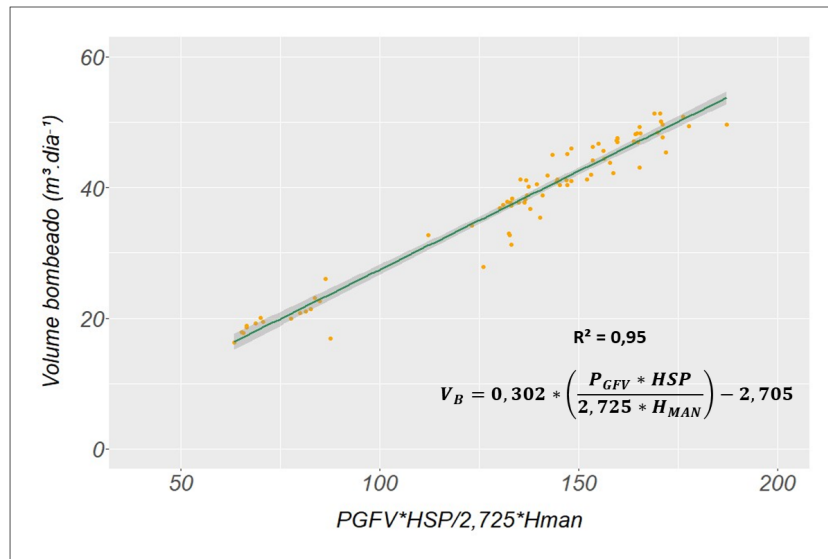
O número de dias de ensaios com $PD \leq 25\%$ na altura manométrica de maior eficiência totalizou 99 observações (25 coletadas na UNIFAP e 74 na USP); já o número de amostras com $PD \leq 30\%$ na altura de maior eficiência foi de 124 amostras (31 medidas na UNIFAP e 93 na USP) e, por fim, a quantidade de ensaios com $PD \leq 40\%$ na altura manométrica de maior eficiência correspondeu a um total de 169 amostras (37 observações na UNIFAP e 132 na USP). No caso da motobomba Schneider de 0,5 cv, o número de dias com $PD \leq 30\%$ e $PD \leq 40\%$ foi o mesmo número de amostras com $PD \leq 25\%$, visto que não foi possível determinar o nível de proporção de irradiação difusa de seis (6) dias de medições, devido a falhas operacionais das células calibradas utilizadas na UNIFAP para medição da irradiação difusa e global no plano horizontal.

A partir das amostras coletadas, foram construídos três modelos empíricos: o primeiro modelo englobou ensaios com $PD \leq 25\%$, o segundo utilizou amostras com $PD \leq 30\%$ e o último empregou observações com $PD \leq 40\%$. Inicialmente, cada um dos três modelos foi construído com base em 80% das observações (dados de treino), cuja quantidade depende do modelo: para aquele que considera apenas amostras com $PD \leq 25\%$, utilizaram-se 79 dados de

treino; para aqueles que englobam observações com $PD \leq 30\%$, empregaram-se 99 dados de treino e, para aqueles que envolvem amostras com $PD \leq 40\%$, o número de dados de treino foi de 135.

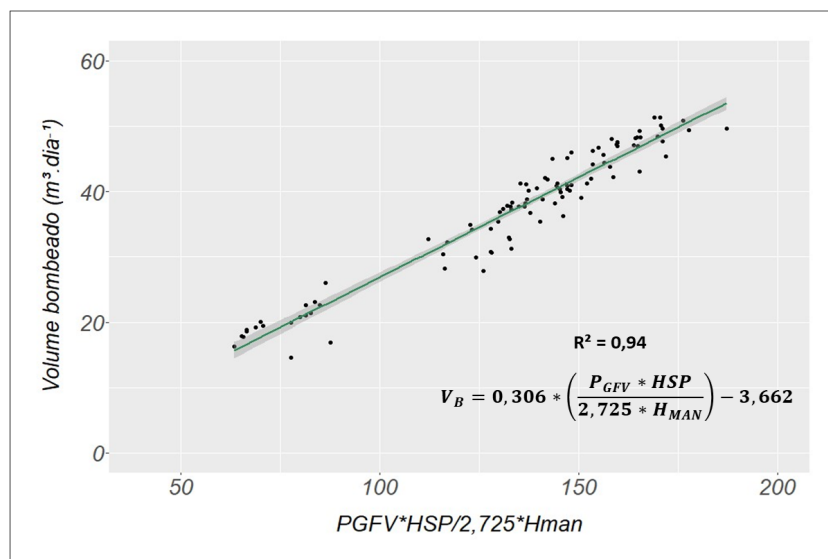
As retas de regressão linear simples, obtidas pelo MMQO para cada um dos três modelos empíricos, estão descritas nas Figuras 4.14, 4.15 e 4.16.

Figura 4.14 – Modelo empírico de estimativa do volume bombeado desenvolvido com observações com $PD \leq 25\%$ (com dados de treino).



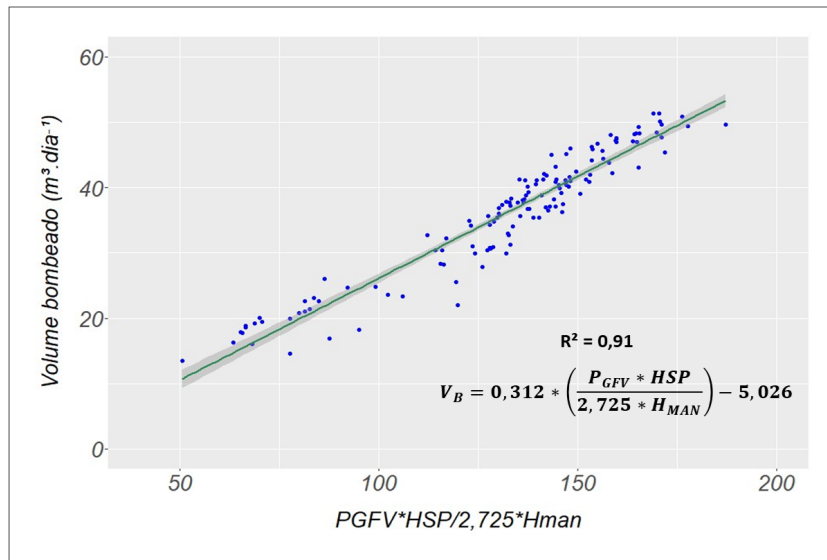
Fonte: Autoria própria (2023).

Figura 4.15 – Modelo empírico de estimativa do volume bombeado desenvolvido com observações com $PD \leq 30\%$ (com dados de treino).



Fonte: Autoria própria (2023).

Figura 4.16 – Modelo empírico de estimativa do volume bombeado desenvolvido com observações com $PD \leq 40\%$ (com dados de treino).



Fonte: Autoria própria (2023).

Em relação ao cumprimento do primeiro dos requisitos de MMQO, a existência de linearidade dos parâmetros depende da forma funcional do modelo. Como os modelos empíricos desenvolvidos apresentam os coeficientes de regressão ou parâmetros (a e b) com expoentes iguais a 1, eles são lineares nos parâmetros.

A verificação do atendimento das premissas de homoscedasticidade, normalidade e independência dos resíduos foi realizada por meio dos testes de hipótese de *Breusch-Pagan*, *Shapiro-Wilk* e *Durbin-Watson*, respectivamente. Para os modelos empíricos desenvolvidos, os resultados obtidos foram os descritos na Tabelas 4.7, 4.8 e 4.9.

Tabela 4.7 – Resultados relativos aos testes de hipóteses de requisitos do MMQO aplicados ao modelo empírico desenvolvido para dados com $PD \leq 25\%$.

Testes de Hipótese	Valor-p associado	Conclusão
Teste de <i>Breusch-Pagan</i>	0,747017	Atendimento a hipótese nula
Teste de <i>Shapiro-Wilk</i>	0,0002643	Atendimento a hipótese alternativa
Teste de <i>Durbin-Watson</i>	0,6379	Atendimento a hipótese nula

Fonte: Autoria própria (2023).

Tabela 4.8 – Resultados relativos aos testes de hipóteses de requisitos do MMQO aplicados ao modelo empírico desenvolvido para dados com $PD \leq 30\%$.

Testes de Hipótese	Valor-p associado	Conclusão
Teste de <i>Breusch-Pagan</i>	0,7529124	Atendimento a hipótese nula
Teste de <i>Shapiro-Wilk</i>	0,0009971	Atendimento a hipótese alternativa
Teste de <i>Durbin-Watson</i>	0,1218	Atendimento a hipótese nula

Fonte: Autoria própria (2023).

Tabela 4.9 – Resultados relativos aos testes de hipóteses de requisitos do MMQO aplicados ao modelo empírico desenvolvido para dados com $PD \leq 40\%$.

Testes de Hipótese	Valor-p associado	Conclusão
Teste de <i>Breusch-Pagan</i>	0,195467	Atendimento a hipótese nula
Teste de <i>Shapiro-Wilk</i>	0,0002455	Atendimento a hipótese alternativa
Teste de <i>Durbin-Watson</i>	0,01718	Atendimento a hipótese alternativa

Fonte: Autoria própria (2023).

A partir dos resultados obtidos nas Tabelas 4.7, 4.8 e 4.9, pode-se observar que os três modelos apresentam resíduos homocedásticos, dado o atendimento à hipótese nula do teste de *Breusch-Pagan*. Os modelos contendo observações com $PD \leq 25\%$ e $PD \leq 30\%$ apresentam resíduos independentes, visto o atendimento à hipótese nula do teste de *Durbin-Watson*. No entanto, o modelo obtido a partir de observações com $PD \leq 40\%$ apresenta resíduos que não são independentes, visto que a hipótese alternativa foi atendida. Por fim, os resíduos dos três modelos desenvolvidos não apresentam distribuição normal, o que poderia levar a interpretações equivocadas sobre o parâmetro valor-p do teste ANOVA de regressão e a respeito do intervalo de confiança dos coeficientes de regressão estimados. No entanto, para amostras relativamente grandes (onde o número de observações para cada variável é maior do que 10), como é o caso do presente estudo, não se observa impactos significativos em caso de violação da premissa de normalidade (SCHMIDT; FINAN, 2018).

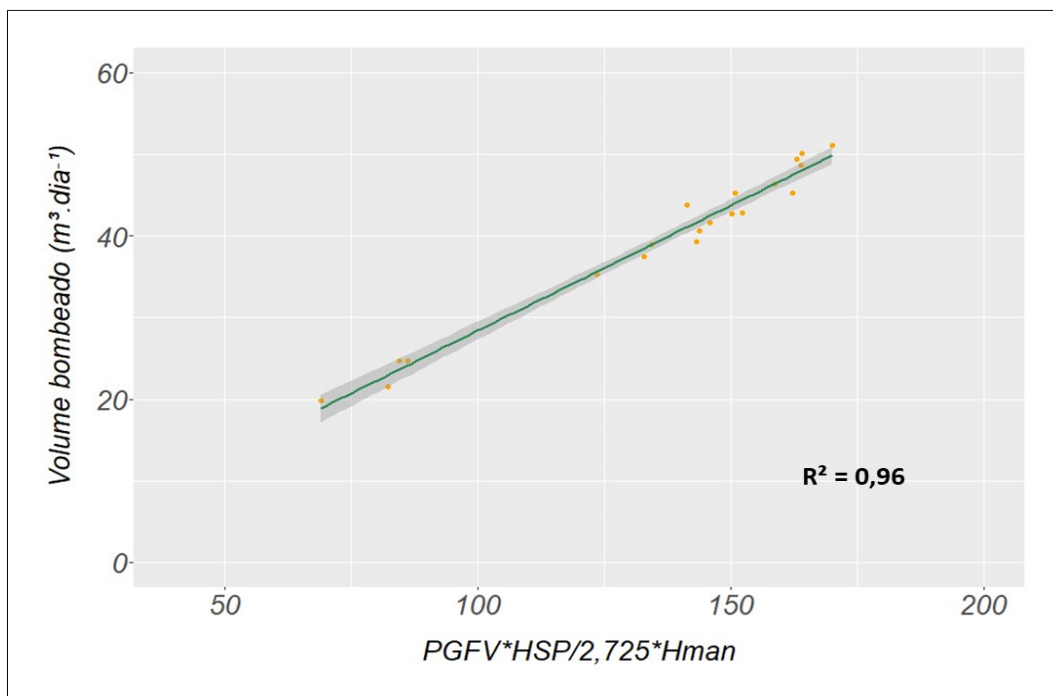
Em relação à significância estatística, observou-se que o valor-p obtido para o teste t

de significância do coeficiente angular, para os três modelos de regressão linear simples, foi de $2 \cdot 10^{-16}$, o que sugere que a variável independente explica, de maneira estatisticamente significativa, as variações na variável dependente. O valor-p obtido para o teste t de significância do intercepto para os modelos com $PD \leq 25\%$ foi de $1,6 \cdot 10^{-2}$; para os modelos com $PD \leq 30\%$, o valor-p foi de $1,4 \cdot 10^{-3}$ e, para os modelos com $PD \leq 40\%$, o valor-p foi de $1,4 \cdot 10^{-5}$. Estes resultados indicam que o intercepto foi estatisticamente significativo para os três modelos.

Em relação à avaliação do ajuste e qualidade de cada um dos três modelos empíricos, aqueles construídos a partir de observações com $PD \leq 25\%$, $PD \leq 30\%$ e $PD \leq 40\%$ apresentaram, respectivamente, coeficientes de determinação (R^2) iguais a 0,95, 0,94 e 0,91 e valores de Erro Médio Percentual Absoluto (MAPE) de 4,98%, 5,93% e 7,35%. Esses resultados indicam que o modelo desenvolvido se ajusta bem aos dados coletados.

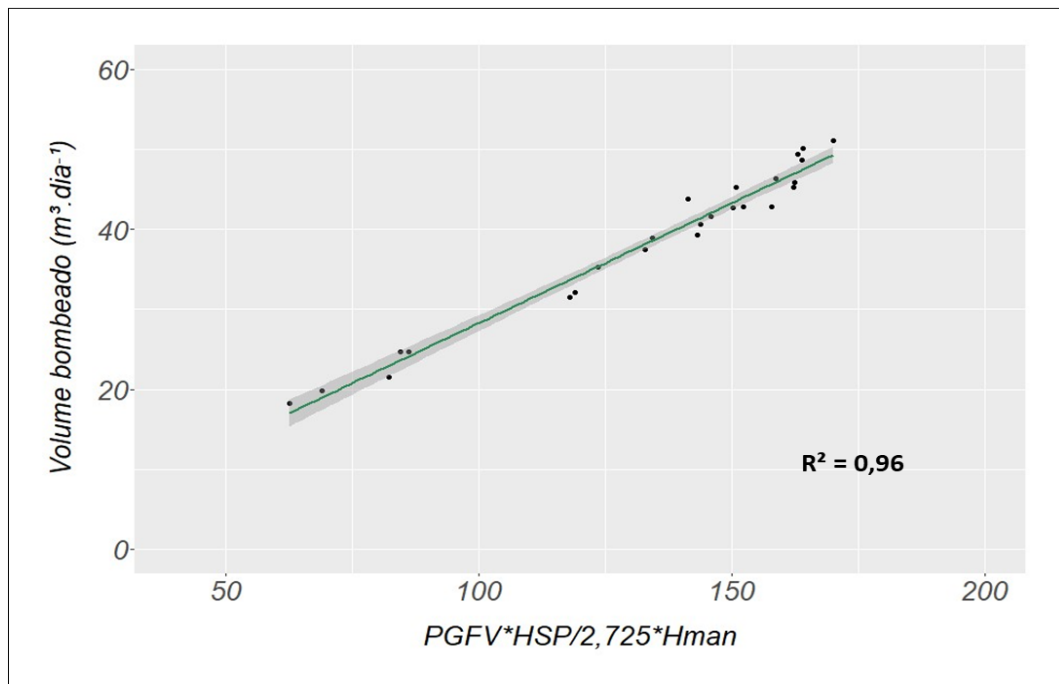
Em relação à etapa de validação dos modelos, o número de dados de teste para o modelo empírico construído a partir de observações contendo $PD \leq 25\%$ foi de 20 amostras; para o modelo feito a partir de observações englobando $PD \leq 30\%$, foram utilizadas 25 amostras de teste e para o modelo desenvolvido a partir de ensaios contendo apenas amostras com $PD \leq 40\%$, foram empregados 34 dados de teste. As Figuras 4.17, 4.18 e 4.19 apresentam a mesma reta de regressão dos modelos empíricos propostos anteriormente, mas agora com os dados de teste, a fim de validar a robustez de cada um dos modelos em casos de novas observações.

Figura 4.17 – Modelo empírico de estimativa do volume bombeado desenvolvido com observações com $PD \leq 25\%$ (com dados de teste).



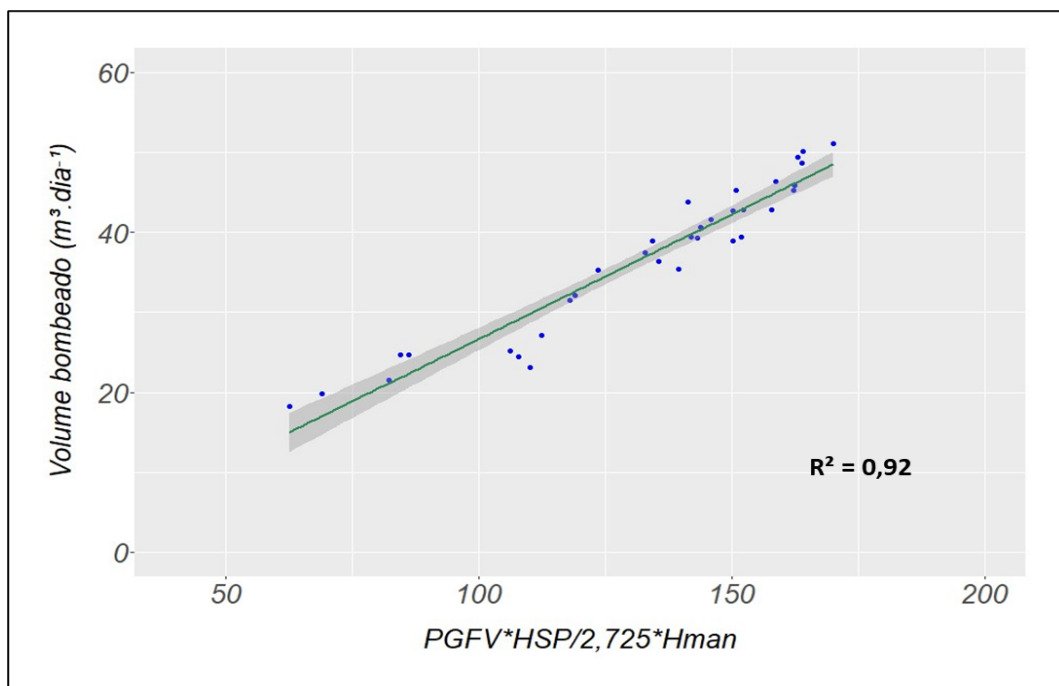
Fonte: Autoria própria (2023).

Figura 4.18 – Modelo empírico de estimativa do volume bombeado desenvolvido com observações com $PD \leq 30\%$ (com dados de teste).



Fonte: Autoria própria (2023).

Figura 4.19 – Modelo empírico de estimativa do volume bombeado desenvolvido com observações com $PD \leq 40\%$ (com dados de teste).



Fonte: Autoria própria (2023).

Após realizar o processo de validação dos três modelos, observou-se que o R^2 associado aos dados de teste foi levemente maior do que aqueles obtidos com os dados de treino. Os modelos empíricos construídos a partir de observações com $PD \leq 25\%$, $PD \leq 30\%$ e $PD \leq 40\%$ apresentaram, respectivamente, coeficientes de determinação para os dados de teste (R^2) iguais a 0,96, 0,96 e 0,92 para os dados de teste. Complementarmente, foram observados valores menores de MAPE associados aos dados de teste para os três modelos desenvolvidos do que aqueles obtidos para os dados de treino: 3,77% (para modelo com $PD \leq 25\%$), 4,59% (para modelo com $PD \leq 30\%$) e 6,91% (para modelo com $PD \leq 40\%$). Esses resultados indicam que todos os três modelos são capazes de prever, com boa acurácia, novas observações.

No entanto, diante de todos os resultados obtidos quanto ao atendimento aos requisitos de MMQO, significância estatística dos modelo coeficientes do modelo e acurácia (métricas de erro), recomenda-se que seja utilizado no dimensionamento de Sistemas Fotovoltaicos de Bombeamento o modelo empírico que engloba dados com $PD \leq 25\%$. Este modelo, além de atender os requisitos de linearidade dos parâmetros e homoscedasticidade e independência dos resíduos, apresenta os coeficientes angular e linear (intercepto) estatisticamente significantes e erros médios absolutos percentuais abaixo de 5%.

4.3.1.1 Condições de contorno do modelo empírico selecionado

A aplicação de modelos empíricos produz resultados mais satisfatórios e fidedignos com a realidade para novas observações que estejam dentro dos intervalos de medição e condições de contorno aos quais as amostras originais estavam submetidas. Neste sentido, a utilização deste modelo empírico é recomendada para o dimensionamento de Sistemas Fotovoltaicos de Bombeamento que obedecem às seguintes condições:

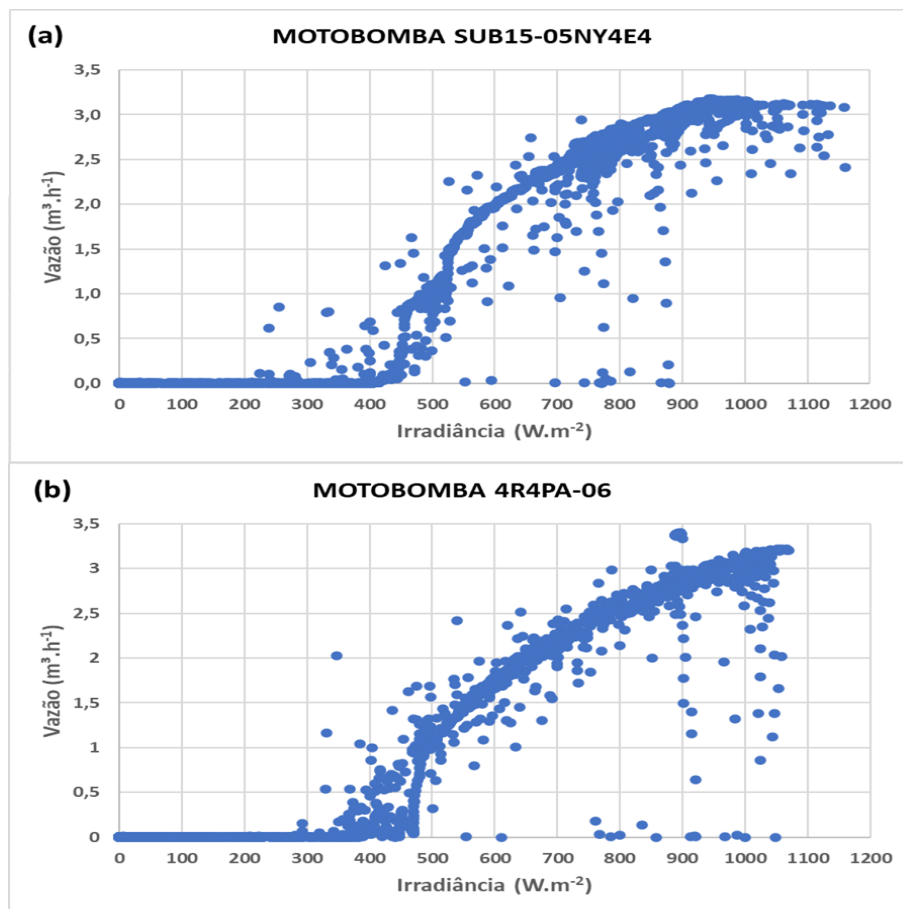
- Geradores fotovoltaicos com potência de placa entre $900 W_p$ e $3350 W_p$;
- Motobombas centrífugas com potência variando entre 0,5 cv e 2 cv;
- Motobombas centrífugas contendo entre 4 e 9 estágios;
- Altura manométrica a ser superada está entre 29 e 50 m.c.a.;
- Irradiação diária no plano do gerador fotovoltaico variando entre 4,8 a $7,5 \text{ kWh.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$;
- Vazão de projeto do sistema em um intervalo de 3 a $7,7 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$;
- Volume diário demandado entre 16 e $52 \text{ m}^3.\text{dia}^{-1}$;
- Sistema dimensionado para operar em torno da região de máxima eficiência da motobomba;
- Fator de dimensionamento (FD) variando entre 2 e 2,4.

4.3.2 Validação do dimensionamento dos geradores fotovoltaicos a partir das curvas Vazão em função da Irradiância

A partir dos ensaios a sol real com as motobombas das configurações 1 a 8 da Tabela 3.1 (página 61) em suas respectivas alturas manométricas de maior eficiência, foi possível obter as curvas da vazão bombeada em função dos níveis de irradiância solar no plano do gerador fotovoltaico para dias com baixa proporção de irradiação difusa ($PD \leq 25\%$). Por meio da análise do comportamento dessas curvas, foi possível validar se o tamanho do gerador fotovoltaico utilizado estava adequado para o sistema fotovoltaico de bombeamento.

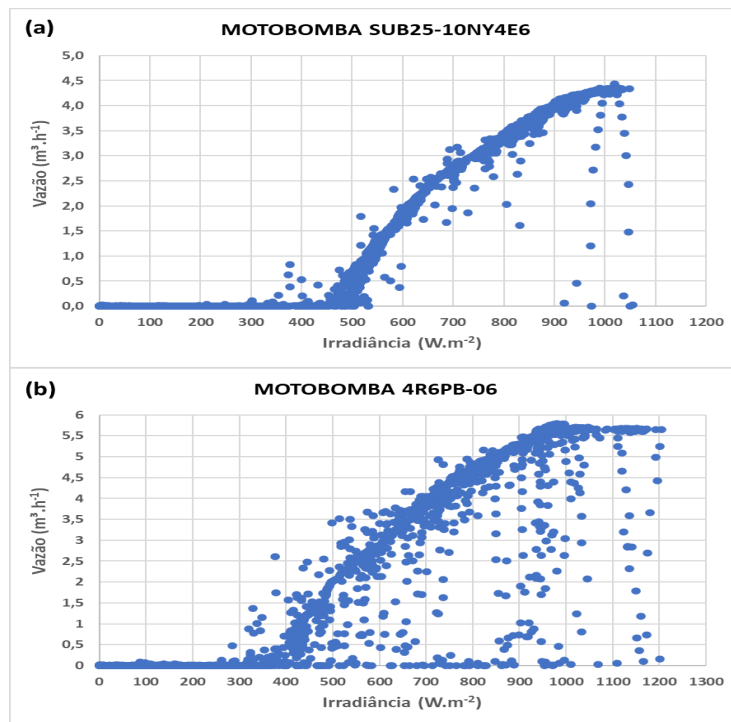
Os gráficos da Figura 4.20 (a) e (b) correspondem, respectivamente, às curvas Vazão em função da Irradiância para a altura de maior eficiência relativo às motobombas de 0,5 cv; os gráficos da Figura 4.21 (a) e (b) representam as curvas das motobombas de 1 cv; os gráficos da Figura 4.22 (a) e (b), as curvas das motobombas de 1,5 cv e, por fim, os gráficos da Figura 4.23 (a) e (b) apresentam as curvas das motobombas de 2 cv. Os gráficos (a) apresentam motobombas da Schneider e os (b), das motobombas Leão.

Figura 4.20 – Curva da Vazão ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$) em função da Irradiância ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$): (a) Schneider 0,5 cv – 22/06/2021 ; (b) Leão 0,5 cv – 20/08/2021.



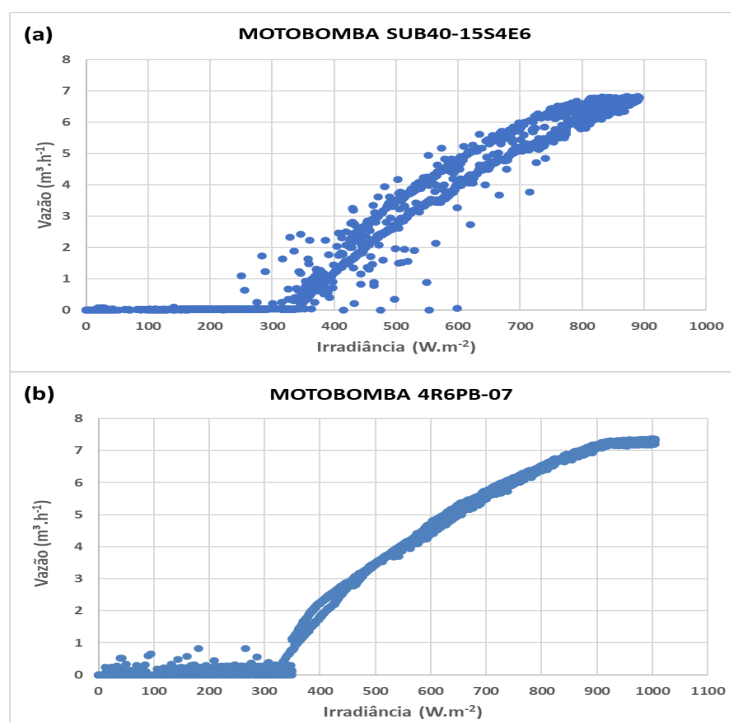
Fonte: Autoria própria (2023).

Figura 4.21 – Curva da Vazão ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$) em função da Irradiância ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$): (a) Schneider 1 cv – 13/10/2021; (b) Leão 1 cv – 22/01/2022.



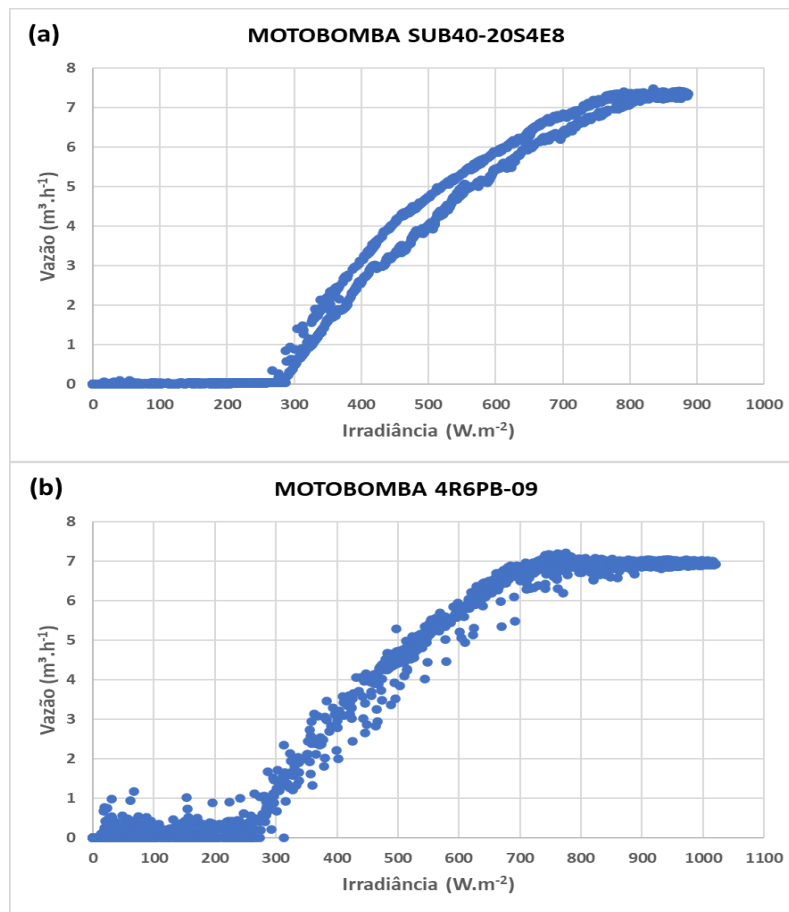
Fonte: Autoria própria (2023).

Figura 4.22 – Curva da Vazão ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$) em função da Irradiância ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$): (a) Schneider 1,5 cv – 14/06/2021 ; (b) Leão 1,5 cv – 05/05/2021.



Fonte: Autoria própria (2023).

Figura 4.23 – Curva da Vazão ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$) em função da Irradiância ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$): (a) Schneider 2 cv – 10/07/2021; (b) Leão 2 cv – 06/08/2021.



Fonte: Autoria própria (2023).

Um indicativo de que o gerador fotovoltaico está subdimensionado em relação aos requerimentos da motobomba é quando a vazão bombeada não atinge seu valor máximo, mesmo em níveis de irradiância acima dos $1000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$. Por outro lado, quando a vazão bombeada atinge seu valor máximo com níveis de irradiância bem menores do que $1000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, pode-se concluir que o tamanho do gerador fotovoltaico está sobredimensionado em relação aos requerimentos da motobomba. Por fim, nos casos em que a potência do gerador fotovoltaico está compatível com os requerimentos da motobomba, os valores de vazão se tornam estáveis próximos a uma irradiância de $1000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$.

Os gráficos das Figuras 4.20 e 4.21 indicam que as potências dos geradores fotovoltaicos estão compatíveis com as necessidades elétricas das motobombas de 0,5 cv e de 1 cv. Para a motobomba Schneider de 0,5 cv, a vazão máxima foi atingida a uma irradiância de cerca $900 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$; para a motobomba Leão de 1 cv, a vazão de bombeio se estabilizou a partir de níveis de irradiância próximos a $950 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ e para os equipamentos Leão de 0,5 cv e Schneider de 1 cv, a estabilidade da vazão foi obtida a partir de irradiâncias próximas a $1000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$. Além disso,

Macapá, cidade em que está situado o laboratório da UNIFAP onde as motobombas de menor porte foram testadas a sol real, apresenta picos de irradiância de 1200 W.m^{-2} , garantindo, assim, que as motobombas operem em sua vazão nominal por maiores períodos.

Os gráficos das Figuras 4.22 e 4.23 indicam que a potência do gerador fotovoltaico está compatível com o requerimento elétrico da motobomba Leão de 1,5 cv, pois a vazão torna-se estável a partir de irradiâncias de 900 W.m^{-2} . Por outro lado, os geradores fotovoltaicos estão sobredimensionados em relação às necessidades elétricas das motobombas Schneider de 1,5 cv e 2 cv e da Leão de 2 cv. Para as duas primeiras, a vazão foi estabilizada a uma irradiância de 800 W.m^{-2} e para a última, a irradiância a partir da qual a vazão tornou-se estável foi de 700 W.m^{-2} . No entanto, em um contexto de redução de preços de equipamentos fotovoltaicos, o sobredimensionamento pode ser vantajoso, pois permite que a motobomba trabalhe um período maior à vazão nominal.

5 CONCLUSÃO

A utilização de sistemas fotovoltaicos de bombeamento de água é uma alternativa para o abastecimento de populações rurais, especialmente em localidades remotas, onde não há acesso à rede elétrica e nem ao abastecimento contínuo de combustíveis como o diesel e a gasolina. O acesso à água é primordial não apenas para a sobrevivência humana, mas também para o desenvolvimento das atividades econômicas campestres, como agricultura e pecuária.

Diante desse papel socioeconômico importante do acesso à água, esta dissertação de mestrado visa contribuir para o adequado dimensionamento de sistemas fotovoltaicos de bombeamento através do desenvolvimento de um modelo empírico geral para estimativa do volume bombeado ao longo do ciclo por Sistemas Fotovoltaicos de Bombeamento constituídos por componentes amplamente disponíveis no mercado brasileiro: módulo fotovoltaico de silício cristalino, bombas centrífugas submersas, motores de indução trifásicos e conversores de frequência.

Para tal, oito configurações de SFB foram submetidas a ensaios a sol real. Tais configurações compreenderam motobombas de 0,5 cv, 1 cv, 1,5 cv e 2 cv, sendo duas de dois fabricantes distintos para cada faixa de potência. A partir da compilação dos dados coletados nestes testes, realizados na altura manométrica de maior eficiência de cada uma das motobombas, foi obtido um conjunto de variáveis importantes para o desenvolvimento do modelo empírico: volume bombeado diário, irradiação solar no plano do gerador fotovoltaico e altura manométrica. Por outro lado, a potência nominal real do gerador fotovoltaico foi determinada a partir de ensaios de obtenção de curvas I-V e P-V com equipamentos solarimétricos.

Com os dados de entrada mencionados no parágrafo anterior, foram desenvolvidos três modelos: um considerando amostras com $PD \leq 25\%$, outro com dados com $PD \leq 30\%$ e o último levando em conta dias com $PD \leq 40\%$. Dentre estes, o modelo mais adequado foi aquele com amostras com $PD \leq 25\%$. Neste caso, as premissas de homoscedasticidade e independência dos resíduos (associadas ao MMQO) foram satisfeitas, os coeficientes do modelo apresentaram uma significância estatística e obteve-se um coeficiente de determinação (R^2) de 0,95 e MAPE menor do que 5%. A partir destes resultados, corrobora-se a veracidade da hipótese do presente estudo: há uma relação entre o volume efetivamente bombeado (V_B) e a expressão formada pelo resultado da multiplicação entre o volume demandado e a potência do gerador fotovoltaico dividido pela potência hidráulica requerida pela motobomba, $(V_D * P_{GFV})/P_H$.

Diante do exposto, a contribuição apresentada pelo presente estudo é o fornecimento, aos projetistas, de uma equação para o cálculo do volume bombeado de água por SFB. Este modelo empírico dispensa utilização computacional e seus parâmetros podem ser obtidos tanto a partir de catálogos técnicos de fabricantes (potência nominal do gerador fotovoltaico) como de bases de dados ambientais (irradiação global no plano do gerador fotovoltaico e perfil hidrogeológico

dos poços) disponíveis na Internet.

O modelo empírico proposto pode ser aplicável para boa parte dos casos de dimensionamento de SFB no país, visto que as condições de contorno de muitos projetos são similares às quais foram realizados os ensaios a sol real. Por exemplo, praticamente todas as regiões do país, exceto a região Norte e a porção leste da região Sul, apresentam uma irradiação global no plano do gerador FV que está entre 4,75 e 6,25 kWh.m⁻².dia⁻¹, intervalo este que está quase em sua totalidade dentro da faixa de realização dos ensaios (4,8 a 7,5 kWh.m⁻².dia⁻¹). Outro exemplo é que grande parte das demandas de fornecimento de água para consumo humano e dessedentação animal encontra-se na faixa de potências analisadas neste trabalho.

No entanto, há algumas lacunas que o presente trabalho apresenta e que podem ser preenchidas com novos estudos, dentre os quais destacam-se:

- Realização de ensaios a sol real para as mesmas motobombas testadas no presente trabalho em outras alturas manométricas da região de maior eficiência para montagem de ábacos de dimensionamento;
- Realização de ensaios a sol real com motobombas centrífugas submersas de maior potência (acima de 2 cv) a maiores alturas manométricas;
- Realização de ensaios a sol real com motobombas de deslocamento positivo;
- Determinação do fator de dimensionamento (FD) ideal para motobombas centrífugas com diferentes faixas de potências e eficiências.

REFERÊNCIAS

- ABELLA, M. A.; LORENZO, E.; CHENLO, F. PV water pumping systems based on standard frequency converters. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, v. 11, n. 3, p. 179–191, 2003. ISSN 1099-159X. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/pip.475>>.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). *Manual de usos consuntivos da água no Brasil*. Brasília, DF: ANA, 2019. ISBN 978-85-8210-057-8.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). *Base Nacional de Referências de Usos Consuntivos da Água no Brasil: Usos Setoriais da Água - Retirada Média Anual*. [S.l.], 2022. Disponível em: <<https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiMWE2ZTE1NmItOGUyZS00ZTc1LTljMzUtNDgwYjVhODcyNWl1IiwidCI6ImUwYmI0MDEyLTgxMGItNDY5YS04YjRkLTY2NzZjZDFiYWY4OCJ9>>. Acesso em: 24 nov. 2022.
- ALI, B. Comparative assessment of the feasibility for solar irrigation pumps in Sudan. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 81, p. 413–420, jan. 2018. ISSN 1364-0321. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032117311334>>.
- ALVARENGA, C. A. Bombeamento de água com energia solar fotovoltaica. *Solenerg Engenharia e Comércio Ltda*, Belo Horizonte, MG, 2007. Disponível em: <<https://www.solenerg.com.br/files/Bombeamento-de-agua-com-energia%20solar-Solenerg-Engenharia.pdf>>.
- BAHADORI, M. N. Solar water pumping. *Solar Energy*, v. 21, p. 307–316, jan. 1978. ISSN 0038-092X.
- BALAJ, C. I.; MAN, T. E.; PAULESCU, M. Performance assessment of a direct-coupled PV water pumping system. *AIP Conference Proceedings*, v. 1796, n. 1, p. 040012, jan. 2017. ISSN 0094-243X. Disponível em: <<https://doi.org/10.1063/1.4972390>>.
- BENGHANEM, M.; DAFFALLAH, K. O.; ALAMRI, S. N.; JORAID, A. A. Effect of pumping head on solar water pumping system. *Energy Conversion and Management*, v. 77, p. 334–339, jan. 2014. ISSN 0196-8904. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890413006043>>.
- BENGHANEM, M.; DAFFALLAH, K. O.; JORAID, A. A.; ALAMRI, S. N.; JABER, A. Performances of solar water pumping system using helical pump for a deep well: A case study for Madinah, Saudi Arabia. *Energy Conversion and Management*, v. 65, p. 50–56, jan. 2013. ISSN 0196-8904. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890412003299>>.
- BIONE, J.; VILELA, O. C.; FRAIDENRAICH, N. Comparison of the performance of PV water pumping systems driven by fixed, tracking and V-trough generators. *Solar Energy*, v. 76, n. 6, p. 703–711, jan. 2004. ISSN 0038-092X. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X0400009X>>.
- BORGES, A. L.; SOUZA, L. da S. Banana: Relações/Clima. *Portal Embrapa*, dez. 2021. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/en/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/banana/pre-producao/especie/relacoes/clima>>. Acesso em: 13 out. 2022.

BRAHMI, A.; ABOUNADA, A.; CHBIRIK, G.; AMRANI, A. E. Design and optimal choice of a 1.5 kW photovoltaic pumping system for irrigation purposes. *AIP Conference Proceedings*, v. 2056, n. 1, p. 020004, dez. 2018. ISSN 0094-243X. Disponível em: <<https://doi.org/10.1063/1.5084977>>.

BRITO, A. U. *Otimização do acoplamento de geradores fotovoltaicos a motores de corrente alternada através de conversores de frequência comerciais para acionar bombas centrífugas*. Dissertação (Mestrado) — Universidade de São Paulo, maio 2006. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/86/86131/tde-05112018-160811/>>.

BRITO, A. U.; FEDRIZZI, M. C.; ZILLES, R. PV pumping systems: a useful tool to check operational performance. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, John Wiley & Sons, Ltd., v. 15, n. 1, p. 41–49, 2007. ISSN 1099-159X. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/pip.710>>.

CARVALHO, M. T. de M. Cultivo de Feijão: Impacto Ambiental. *Portal Embrapa*, out. 2021. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/en/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/feijao/pre-producao/impacto-ambiental>>. Acesso em: 13 out. 2022.

CATON, P. Design of rural photovoltaic water pumping systems and the potential of manual array tracking for a West-African village. *Solar Energy*, v. 103, p. 288–302, maio 2014. ISSN 0038-092X. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X14001029>>.

CHANDEL, S. S.; NAIK, M. N.; CHANDEL, R. Review of solar photovoltaic water pumping system technology for irrigation and community drinking water supplies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 49, p. 1084–1099, set. 2015. ISSN 1364-0321. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032115003536>>.

CHILUNDO, R. J.; MAHANJANE, U. S.; NEVES, D. Design and Performance of Photovoltaic Water Pumping Systems: Comprehensive Review towards a Renewable Strategy for Mozambique. *Journal of Power and Energy Engineering*, Scientific Research Publishing, v. 6, n. 7, p. 32–63, jul. 2018. Disponível em: <<http://www.scirp.org/Journal/Paperabs.aspx?paperid=86300>>.

EBARA. *Motobombas Submersas para poços de mín. 4”*. [S.l.], 2023. (Modelo 4BPL6). Disponível em: <<https://www.ebara.com.br/download/cHJvZHV0b3MvNEJQTDYucGRm>>. Acesso em: 29 out. 2023.

ELETROBRÁS; PROCEL; INDÚSTRIA, P.; IEL; CNI. *Bombas: guia básico*. Brasília: CNI, IEL, ELETROBRÁS, 2009a. (Procel Indústria – Edição Seriada 9). ISBN 978-85-87257-32-1.

ELETROBRÁS; PROCEL; INDÚSTRIA, P.; IEL; CNI. *Motor elétrico: guia básico*. Brasília: CNI, IEL, ELETROBRÁS, 2009b. (Procel Indústria – Edição Seriada 6). ISBN 978-85-87257-30-7.

ETECHNOG. *How CPU fan works, BLDC motor*. *ETechnoG - Electrical, Electronics, and Technology*, [S. l.], 2018. Disponível em: <<https://www.etechnog.com/2018/10/how-cpu-fan-works-bldc-motor.html>>. Acesso em: 22 nov. 2022.

FAHAD, E. Types of Rotary Pumps, Screw Pump, Gear Pump, Lobe Pump, and Vane Pump. *Electronic Clinic*, [S. l.], out. 2020. Disponível em: <<https://www.electronicclinic.com/types-o>>

f-rotary-pumps-screw-pump-gear-pump-lobe-pump-and-vane-pump/>. Acesso em: 10 out. 2022.

FEDRIZZI, M. C. *Fornecimento de água com sistemas de bombeamento fotovoltaicos: dimensionamento simplificado e análise de competitividade para sistemas de pequeno porte*. Dissertação (Mestrado) — Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1997.

FOSTER, R.; GHASSEMI, M.; COTA, A. *Solar energy: renewable energy and the environment*. Boca Raton: CRC Press, 2009. (Energy and the environment). ISBN 978-1-4200-7566-3.

FRAIDENRAICH, N.; VILELA, O. C. Avanços Em Sistemas de Abastecimento de Água Com Bombeamento Fotovoltaico para Comunidades Rurais. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos (RBRH)*, v. 4, n. 3, p. 69 – 81, 1999.

GIL, A. C. *Como Elaborar Projetos de Pesquisa*. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2002. ISBN 85-224-3169-8.

GLEICK, P. H. Basic Water Requirements for Human Activities: Meeting Basic Needs. *Water International*, Routledge, v. 21, n. 2, p. 83–92, jun. 1996. ISSN 0250-8060. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/02508069608686494>>.

GOPAL, C.; MOHANRAJ, M.; CHANDRAMOHAN, P.; CHANDRASEKAR, P. Renewable energy source water pumping systems — A literature review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 25, p. 351–370, 2013. ISSN 1364-0321. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032113002633>>.

GUALTEROS, S.; ROUSSE, D. R. Solar water pumping systems: A tool to assist in sizing and optimization. *Solar Energy*, v. 225, p. 382–398, 2021. ISSN 0038-092X. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X21005387>>.

HALCROW, W. *Small-scale solar-powered irrigation pumping systems: technical and economic review*. Londres: [s.n.], 1981. 188 p. (UNDP Projeto CLO/78/004).

HARDHAT ENGINEER. *Centrifugal Pump Working and Types - A Complete Guide*. [S.l.], 2020. Disponível em: <<https://hardhatengineer.com/centrifugal-pump-types-working/>>. Acesso em: 13 out. 2022.

HARTUNG, H.; PLUSCHKE, L. *The Benefits and Risks of Solar Powered Irrigation – a global overview*. [S.l.]: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2018. ISBN 978-92-5-130479-2.

HILARYDOSS, S. Suitability, sizing, economics, environmental impacts and limitations of solar photovoltaic water pumping system for groundwater irrigation—a brief review. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 30, n. 28, p. 71491–71510, jun. 2023. ISSN 1614-7499. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s11356-021-12402-1>>.

HT INSTRUMENTS. *I-V400w - I-V500w – SOLAR I-Vw – SOLAR I-Ve: User Manual*. [S.l.], 2017. 80 p. Disponível em: <https://data2.manualslib.com/pdf6/131/13011/1301015-ht-solar_iww.pdf?79031d7f65ebd8ced75587e117350f7d>. Acesso em: 06 dez. 2022.

- HULTON, G. *Global costs and benefits of drinking-water supply and sanitation interventions to reach the MDG target and universal coverage*. [S.l.], 2012. (World Health Organization). Disponível em: <<https://apps.who.int/iris/handle/10665/75140>>.
- HYDRAULIC INSTITUTE. What is the Difference Between Centrifugal & Rotodynamic Pumps. *Pumps and Systems Magazine*, 2019. Disponível em: <<https://www.pumpsandsystems.com/what-difference-between-centrifugal-rotodynamic-pumps>>. Acesso em: 13 out. 2022.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. *Censo Agropecuário 2017: Tabela 6778 - Número de estabelecimentos agropecuários, por tipologia, existência de energia elétrica, condição do produtor em relação às terras, residência da pessoa que dirige o estabelecimento, grupos de atividade econômica e grupos de área total*. [S.l.], 2020. Disponível em: <<https://sidra.ibge.gov.br/tabela/6778#resultado>>. Acesso em: 24 nov. 2022.
- ISOFOTÓN. *Photovoltaic Module ISF-60/12*. [S.l.], 2016. Disponível em: <https://reenergyhub.com/files/hersteller/Isofoton/pdf/Isofoton_ISF-60_12_EN.pdf>. Acesso em: 06 dez. 2022.
- JAFAR, M. A model for small-scale photovoltaic solar water pumping. *Renewable Energy*, v. 19, n. 1, p. 85–90, 2000. ISSN 0960-1481. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148199000208>>.
- KARASSIK, I. J. (Ed.). *Pump handbook*. 4. ed. New York: McGraw-Hill, 2008. ISBN 978-0-07-146044-6.
- KIPRONO, A. W.; LLARIO, A. I. *Solar Pumping for Water Supply: harnessing solar power in humanitarian and development contexts*. Warwickshire, UK: Practical Action Publishing Ltd, 2020. ISBN 978-1-78853-035-4 978-1-78853-036-1.
- KOHNEN, W. Innovation In The Depths: Deep Sea Research and Electric Motors. *ECO Magazine*, [S. l.], 2022. Disponível em: <http://digital.ecomagazine.com/publication/frame.php?i=683954&p=&pn=&ver=html5&view=articleBrowser&article_id=3817348>. Acesso em: 22 nov. 2022.
- KOMAES. *Solar Module – KM(P)85*. [S.l.], 2022. (Tabela de especificações). Disponível em: <<https://www.neosolar.com.br/loja/fileuploader/download/download/?d=0&file=custom%2Fupload%2FFile-1498144095.pdf>>. Acesso em: 06 dez. 2022.
- LEÃO. *Tabela de Seleção de Motobombas: 2021*. [S.l.], 2021. 68 p. (Tabela de especificações). Disponível em: <https://bombasleao.blob.core.windows.net/media/302417/leao_tabela_selecao_2021-11.pdf>. Acesso em: 06 dez. 2022.
- LI, G.; JIN, Y.; AKRAM, M. W.; CHEN, X. Research and current status of the solar photovoltaic water pumping system – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 79, p. 440–458, nov. 2017. ISSN 1364-0321. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032117306925>>.
- MAGALHÃES, A. F. de J.; NASCIMENTO, A. S.; RITZINGER, C. H. S. P.; AZEVÊDO, C. L. L.; ALMEIDA, C. O. de; FILHO, H. P. S.; CARVALHO, J. E. B. de; SOUZA, L. D.; SOUZA, L. da S.; SANTANA, M. do A.; SANCHES, N. F.; PASSOS, O. S.; COELHO, Y. da S. Sistema de Produção de Citros para o Nordeste. *Embrapa Mandioca e Fruticultura*

- Tropical**, [S. l.], 2005. Disponível em: <<https://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FonteSHTML/Citros/CitrosNordeste/index.htm>>. Acesso em: 13 out. 2022.
- MARANHÃO, G. N. A. de; BRITO, A. U.; PINHO, J. T.; FONSECA, J. K. S.; LEAL, A. M.; MACÊDO, W. N. Experimental results of a fuzzy controlled variable-speed drive for photovoltaic pumping systems: A review. *IEEE Sensors Journal*, v. 16, n. 9, p. 2854–2864, 2016.
- MARANHÃO, G. N. d. A. *Controlador fuzzy para uso em conversores de frequência aplicado à sistemas fotovoltaicos de bombeamento*. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) — Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém, 2015. Disponível em: <<https://repositorio.ufpa.br/jspui/handle/2011/7803>>.
- MARQUELLI, W. A.; SILVA, W. L. C. Tomateiro para processamento industrial: irrigação e fertirrigação por gotejamento. *Portal Embrapa*, [S. l.], 2002. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/en/busca-de-publicacoes/-/publicacao/773410/tomateiro-para-processamento-industrial-irrigacao-e-fertirrigacao-por-gotejamento>>.
- MATTOS, P. L. P. de; FARIAS, A. R. N.; FILHO, J. R. F. *Mandioca: o produtor pergunta, a Embrapa responde*. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, Embrapa Mandioca e Fruticultura Tropical, 2006. (Coleção 500 perguntas, 500 respostas).
- MEAH, K.; ULA, S.; BARRETT, S. Solar photovoltaic water pumping — opportunities and challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 12, n. 4, p. 1162–1175, 2008. ISSN 1364-0321. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S136432106001584>>.
- MELLENDEZ, T. A. F. *Avaliação de sistemas fotovoltaicos de bombeamento*. Dissertação (Mestrado) — Universidade de São Paulo, abr. 2009. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/86/86131/tde-30062009-141639/>>.
- MICHAEL SMITH ENGINEERS. Useful information on positive displacement pumps. *Michael Smith Engineers Ltd*, [S. l.], 2022. Disponível em: <<https://www.michael-smith-engineers.co.uk/resources/useful-info/positive-displacement-pumps>>. Acesso em: 13 out. 2022.
- MORALES, L. R. V. *A utilização de sistemas fotovoltaicos de bombeamento para irrigação em pequenas propriedades rurais*. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, set. 2011. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/86/86131/tde-10112011-105243/>>.
- MORALES, L. R. V. *Sistemas Fotovoltaicos de Bombeamento Com Conversores de Frequência e Motobombas de Fabricação Nacional: Avaliação e Orientações para Sua Implantação*. Tese (Doutorado em Ciências) — Universidade de São Paulo – Programa de Pós-Graduação em Energia – Instituto de Energia e Ambiente, São Paulo, 2016.
- MORALES, L. R. V.; MELLENDEZ, T. A.; FEDRIZZI, M. C.; ZILLES, R.; MORAES, A. M. de. Variable-speed drives in photovoltaic pumping systems for irrigation in Brazil. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, v. 15, p. 20–26, jun. 2016. ISSN 2213-1388. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2213138816000254>>.
- MORALES, T. D.; BUSCH, J. *Design of small photovoltaic (PV) solar-powered water pump systems*. Portland, OR: United States Department of Agriculture (USDA), 2010. (Technical Note No. 28).

- NEPOMUCENO, A. B.; MAIA, M. V.; TEIXEIRA, K. C. Análise de viabilidade técnico-econômica de bombas solares em áreas não cobertas pela rede elétrica. In: **2018 Brazilian Technology Symposium**. [S.l.: s.n.], 2018. v. 1. ISBN 2447-8326.
- ODEH, I.; YOHANIS, Y. G.; NORTON, B. Influence of pumping head, insolation and PV array size on PV water pumping system performance. *Solar Energy*, v. 80, n. 1, p. 51–64, jan. 2006. ISSN 0038-092X. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X05002689>>.
- PEREIRA, E. B.; MARTINS, F. R.; GONÇALVES, A. R.; COSTA, R. S.; LIMA, F. J. Lopes de; RÜTHER, R.; ABREU, S. Luna de; TIEPOLO, G. M.; PEREIRA, S. V.; SOUZA, J. G. de. *Atlas Brasileiro de Energia Solar*. 2. ed. São José dos Campos: INPE, 2017. 80 p. ISBN 978-85-17-00089-8. Disponível em: <<http://doi.org/10.34024/978851700089>>.
- PETRUZELLA, F. D.; JÚNIOR, A. P.; NASCIMENTO, J. L. do. *Motores Elétricos e Acionamentos*. 1. ed. [S.l.]: Bookman Editora, 2013. (Série Tekne). ISBN 978-85-8055-257-7.
- PHILIPPS, S.; FRAUNHOFER, I.; WARMUTH, W. **Photovoltaics Report 2022**. Fraunhofer ISE, PSE Projects GmbH, Freiburg, 2022. Disponível em: <<https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/Photovoltaics-Report.pdf>>. Acesso em: 09 abr. 2022.
- PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. CEPTEL – CRESESEB. GTES – Grupo de Trabalho de Energia Solar, Rio de Janeiro (RJ), 2014.
- PRACTICAL ACTION. *Solar (Photovoltaic) Water Pumping*. Reino Unido, 2010. (Technical brief). Disponível em: <https://www.pseau.org/outils/ouvrages/practical_action_solar_photovoltaic_water_pumping_2014.pdf>. Acesso em: 23 mar. 2022.
- PVE PHOTOVOLTAIK ENGINEERING. *Peak Power Measuring Device and I-V-Curve Tracer for PV Modules and Generators*. Alemanha, 2023. (User Manual). Disponível em: <https://www.pv-engineering.de/fileadmin/user_upload/download/Handbuecher/PVPM1000_1040x_2023-03-A4-EN.pdf?fbclid=IwAR1NEmAvdep_e_KjIAPQfzGIU5xX8EAtYww01iLoypVaZT5yZB6FxFkPvdfM>.
- PVSYST. *PVsyst Photovoltaic Software*. [S.l.], 2021. (Software, Versão 7.2). Disponível em: <<https://www.pvsyst.com/download-pvsyst/>>. Acesso em: 16 out. 2022.
- RAGHUWANSHI, S. S.; ARYA, R. Design and performance analysis of conventional and intelligent control for solar water pumping system. In: **2021 Second International Conference on Electronics and Sustainable Communication Systems (ICESC)**. Coimbatore, India: [s.n.], 2021. p. 111–115.
- SANTOS, W. S. dos; TORRES, P. F.; BRITO, A. U.; GALHARDO, M. A. B.; MACÊDO, W. N. A novel fuzzy controller for photovoltaic pumping systems driven by general-purpose frequency converters. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, v. 40, p. 100758, 2020. ISSN 2213-1388. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2213138820302320>>.
- SANTOS, W. S. dos; TORRES, P. F.; BRITO, A. U.; MANITO, A. R. A.; FILHO, G. F. P.; MONTEIRO, W. L.; MACÊDO, W. N. A novel method to determine the optimal operating point for centrifugal pumps applied in photovoltaic pumping systems.

Solar Energy, v. 221, p. 46–59, 2021. ISSN 0038-092X. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X21002863>>.

SCHMIDT, A. F.; FINAN, C. Linear regression and the normality assumption. *Journal of Clinical Epidemiology*, v. 98, p. 146–151, jun. 2018. ISSN 1878-5921.

SCHNEIDER. *Tabela de Curvas VN*. [S. l.; s. n.], 2022a. Disponível em: <<https://schneidermotobombas.blob.core.windows.net/media/203980/Curvas-VN.pdf>>. Acesso em: 24 ago. 2023.

SCHNEIDER. *Tabela de Seleção de Bombas e Motobombas: 2023*. [S. l.; s. n.], 2022b. Disponível em: <https://schneidermotobombas.blob.core.windows.net/media/309005/schneider_tabela_selecao_2023_web.pdf>. Acesso em: 06 dez. 2022.

SECRETARIA NACIONAL DE SANEAMENTO. *Plano Nacional de Saneamento Básico – Plansab: Relatório de Avaliação Anual 2019*. Brasília: Ministério da Integração e do Desenvolvimento Regional, 2021. Disponível em: <<https://www.gov.br/mdr/pt-br/assuntos/saneamento/plansab/RELATRIODEAVALIAOANUALDOPLANSAB20192.pdf>>. Acesso em: 24 nov. 2022.

SHAH, A. (Ed.). *Solar Cells and Modules*. 1. ed. Springer Cham: Springer International Publishing, 2020. v. 301. (Springer Series in Materials Science, v. 301). ISBN 978-3-030-46485-1 978-3-030-46487-5. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/978-3-030-46487-5>>.

SINGH, B.; MURSHID, S. A grid-interactive permanent-magnet synchronous motor-driven solar water-pumping system. *IEEE Transactions on Industry Applications*, v. 54, n. 5, p. 5549–5561, 2018.

SONTAKE, V. C.; KALAMKAR, V. R. Solar photovoltaic water pumping system – A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 59, p. 1038–1067, 2016. ISSN 1364-0321. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032116000514>>.

STEWART, M. *Surface production operations*. Cambridge, Estados Unidos: Gulf Professional Publishing, 2018. Volume IV: Pumps and compressors. ISBN 978-0-12-809895-0.

TIWARI, A. K.; KALAMKAR, V. R.; PANDE, R. R.; SHARMA, S. K.; SONTAKE, V. C.; JHA, A. Effect of head and PV array configurations on solar water pumping system. *Materials Today: Proceedings*, v. 46, p. 5475–5481, 2021. ISSN 2214-7853. International Conference on Innovations in Clean Energy Technologies (ICET2020). Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785320368978>>.

U.S. DEPARTMENT OF ENERGY; HYDRAULIC INSTITUTE. *Improving Pumping System Performance: A Sourcebook for Industry*. 2. ed. [S.l.]: Lawrence Berkeley National Laboratory, 2006. ISBN 978-1-249-02886-4.

VILELA, O.; FRAIDENRAICH, N.; TIBA, C. Photovoltaic pumping systems driven by tracking collectors. experiments and simulation. *Solar Energy*, v. 74, n. 1, p. 45–52, 2003. ISSN 0038-092X. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X03001099>>.

WEG. *CFW500 – Solar Drive*. [S. l.: s. n], 2018. 8 p. Disponível em: <<https://static.weg.net/médias/downloadcenter/h75/hfd/WEG-50075454-CFW500-solar-drive-pt.pdf>>. Acesso em: 06 dez. 2022.

WEG. *CFW500 – Inversor de frequência – Alto desempenho e confiabilidade para melhorar seu processo de produção*. [S. l.: s. n], 2019. 29 p. Disponível em: <<https://www.autservice.com.br/admin/assets/repositorio/bd9b18d5d6d4c3cda0f7ef36060e8081.pdf>>. Acesso em: 06 dez. 2022.

WEG. *Inversor de Frequência CFW900*. [S. l.: s. n], 2022. (Catálogo de produto). Disponível em: <https://www.weg.net/catalog/weg/BR/pt/Automa%C3%A7%C3%A3o-e-Controle-Industrial/Drives/Inversores-de-Frequ%C3%Aancia/Drives-para-Sistemas-Industriais/Inversor-de-Frequ%C3%Aancia-CFW900/Inversor-de-Frequ%C3%Aancia-CFW900/p/MKT_WDC_BRAZIL_PRODUCT_INVERTER_CFW900>. Acesso em: 13 out. 2022.

WENHAM, S. R.; GREEN, M. A.; WATT, M. E.; CORKISH, R. *Applied photovoltaics*. 2. ed. London ; Sterling, VA: Earthscan, 2007. 323 p. ISBN 978-1-84407-401-3.

WORLD BANK GROUP. *Solar Pumping: The Basics*. [S. l.]: The World Bank, 2018.

WORLD BANK GROUP. *Solar Water Pumping Systems: System design, selection and installation guidelines*. [S. l.]: The World Bank, 2019.

WORLD BANK GROUP. *DataBank: World Development Indicators*. [S. l.]: The World Bank, 2022. Disponível em: <<https://databank.worldbank.org/source/world-development-indicators/preview/on#advancedDownloadOptions>>. Acesso em: 24 nov. 2022.

YINGLI SOLAR. *YGE 55 Series*. *Yingli Green Energy Holding Co. Ltd.*, [S. l.: s. n], 2013. Disponível em: <<https://www.overtechsolucoes.com.br/storage/datasheets/04%20-%20Yingli-Modulos-de-50-e-55W.pdf>>. Acesso em: 06 dez. 2022.

YINGLI SOLAR. *YGE 72 Cell: Series 2*. *Yingli Green Energy Holding Co. Ltd.*, [S. l.: s. n], 2019. Disponível em: <http://www.yinglisolar.com/static/assets/uploads/products/downloads/DS_YGE72CELL%20SERIES%20%20-35b_40mm_EN_PT_20190726_V04.pdf>. Acesso em: 22 nov. 2022.

Apêndices

APÊNDICE A – EXEMPLO DE DIMENSIONAMENTO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS DE BOMBEAMENTO UTILIZANDO O MODELO EMPÍRICO DESENVOLVIDO

Dimensione um Sistema Fotovoltaico de Bombeamento para suprir diariamente 25.000 litros de água. Considere 5,5 Horas de Sol Pleno (HSP) e uma altura manométrica de 40 m.

1. Calcule a vazão de projeto (Q), dada em $m^3 \cdot h^{-1}$, utilizando a Equação A.1:

$$Q = \frac{V_D}{HSP} = \frac{25m^3 \cdot dia^{-1}}{5,5h \cdot dia^{-1}} = 4,55m^3 \cdot h^{-1} \quad (A.1)$$

onde:

V_D – Volume diário demandado = $25 m^3 \cdot dia^{-1}$

HSP – Horas de Sol Pleno = $5,5 h \cdot dia^{-1}$

2. Selecione uma motobomba que possui uma vazão nominal escolhida (Q_E) entre 25% -30% maior do que a vazão de projeto (Q) para a mesma altura manométrica (H_{MAN}).

Nesse exemplo, a vazão nominal escolhida (Q_E) da motobomba a 40 m.c.a deve ser igual a determinada na Equação A.2:

$$Q_E = 1,3 * Q = 1,3 * 4,55m^3 \cdot h^{-1} = 5,91m^3 \cdot h^{-1} \quad (A.2)$$

Dessa forma, deve-se selecionar, em um catálogo do fabricante, uma motobomba capaz de fornecer aproximadamente $6 m^3 \cdot h^{-1}$ a uma altura manométrica de 40 m.c.a. A Figura A.1 indica a motobomba selecionada.

Figura A.1 – Motobomba selecionada para a situação-exemplo.

BOMBA MODELO	N° EST.	MOTOR MODELO	POTÊNCIA		VAZÃO E ALTURA MANOMÉTRICA						
			HP	Kw	0,0	2,0	4,0	6,0	8,0	10,0	m ³ /h
4BPL6-03	3	OM4A	0,50	0,37	30,92	27,72	24,65	20,60	14,20	-	m
		OM4A 2F	0,50	0,37							
		M4P2	0,50	0,37							
		4WP	0,50	0,37							
4BPL6-04	4	OM4A	0,75	0,56	40,66	36,40	32,03	27,00	18,80	-	m
		OM4A 2F	0,75	0,56							
		M4P2	0,75	0,56							
		4WP	0,75	0,56							
4BPL6-06	6	OM4A	1,00	0,75	60,79	54,85	47,79	40,00	27,50	7,80	m
		OM4A 2F	1,00	0,75							
		M4P2	1,00	0,75							
		4WP	1,00	0,75							
4BPL6-08	8	OM4A	1,50	1,12	81,08	72,86	64,02	54,60	37,40	9,30	m
		OM4A 2F	1,50	1,12							
		M4P2	1,50	1,12							
		4WP	1,50	1,12							
4BPL6-11	11	OM4A	2,00	1,49	110,10	98,00	84,80	73,00	50,00	13,20	m
		M4P2	2,00	1,49							
		M4P2	2,00	1,49							
		4WP	2,00	1,49							

Fonte: Ebara (2023).

A motobomba selecionada apresenta as seguintes características:

- Fabricante: *Ebara*
- Modelo da bomba: 4BPL6-06.
- Potência de 1 cv.
- Número de estágios: 6

3. Defina a potência do gerador fotovoltaico (P_{GFV}), dada em W_p , baseado na potência de placa do conjunto motobomba (P_{MB}), utilizando a Equação A.3:

$$P_{GFV} = FD * P_{MB} = 2,5 * 750W = 1875W_p \quad (A.3)$$

onde:

FD – Fator de dimensionamento = 2,5. Esse parâmetro foi selecionado tendo como base o maior valor de FD utilizado no presente trabalho.

P_{MB} – Potência nominal do conjunto motobomba = 750 W (1 cv).

4. Calcule o volume bombeamento (V_B), dado em $m^3.dia^{-1}$, utilizando o modelo empírico descrito na Equação A.4:

$$V_B = 0,302 * \left(\frac{P_{GFV} * HSP}{2,725 * H_{man}} \right)^{-2,705} = 0,302 * \left(\frac{1875 * 5,5}{2,725 * 40} \right)^{-2,705} = 25,87 m^3.dia^{-1} \quad (A.4)$$

onde:

P_{GFV} – Potência nominal do gerador fotovoltaico = 1875 W_p (1 cv). Essa potência foi determinada na Equação A.3.

HSP – Horas de Sol Pleno = 5,5 h.dia⁻¹

H_{man} - Altura manométrica a ser superada = 40 m.c.a.

5. Verifique se o Sistema Fotovoltaico de Bombeamento proposto é capaz de proporcionar um volume diário bombeado (V_B) igual ou levemente maior do que o volume diário demandado (V_D).

Nesse caso, tem-se que $V_B = 25,87 m^3.h^{-1}$ e $V_D = 25 m^3.h^{-1}$. Portanto o Sistema Fotovoltaico de Bombeamento selecionado é capaz de atender o volume demandado.