



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

GABRIEL BASTOS DE SOUZA SILVA

**AValiação TEÓRICA EXPERIMENTAL DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS DE
BOMBEAMENTO DE ÁGUA**

DM 03/2024

BELÉM
2024

GABRIEL BASTOS DE SOUZA SILVA

**AVALIAÇÃO TEÓRICA EXPERIMENTAL DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS DE
BOMBEAMENTO DE ÁGUA**

DM 03/2024

Dissertação submetida à Banca Examinadora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFPA para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica na área de Sistemas de Energia Elétrica.

Linha de Pesquisa: Fontes Renováveis.

Orientador: Prof. Dr. Wilson Negrão Macêdo.

BELÉM
2024

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)**

S586a Silva, Gabriel Bastos de Souza.
Avaliação teórica experimental de sistemas fotovoltaicos de
bombeamento de água / Gabriel Bastos de Souza Silva. — 2024.
127 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. Wilson Negrão Macêdo
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará,
Instituto de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Elétrica, Belém, 2024.

1. Sistemas fotovoltaicos de bombeamento. 2. Operação de
motobombas. 3. Curvas de eficiência. I. Título.

CDD 621.042

**“AVALIAÇÃO TEÓRICA EXPERIMENTAL DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS DE
BOMBEAMENTO DE ÁGUA”**

AUTOR: GABRIEL BASTOS DE SOUZA SILVA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA À BANCA EXAMINADORA APROVADA PELO COLEGIADO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA, SENDO JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA ELÉTRICA NA ÁREA DE SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA.

APROVADA EM: 24/01/2024

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Wilson Negrão Macedo
(Orientador – PPGEE/ITEC/UFPA)

Prof. Dr. Marcos André Barros Galhardo
(Avaliador Interno – PPGEE/ITEC/UFPA)

Prof. Dr. Alaan Ubaiara Brito
(Avaliador Externo – UNIFAP)

Dr. Wanderley Sena dos Santos
(Avaliador Externo – EGRESSO/PPGEE/UFPA)

VISTO:

Prof. Dr. Diego Lisboa Cardoso
(Coordenador do PPGEE/ITEC/UFPA)

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha mãe, à minha avó, ao meu noivo, Thiago, e à minha prima, Isabel, que estiveram presentes em minha jornada, proporcionando felicidade, conselhos e apoio nos momentos difíceis e nas conquistas.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, expresso minha gratidão à minha mãe, Rosilene, cujo esforço em fornecer uma base sólida para alcançar meus objetivos é inestimável, sempre acompanhado de seu amor, incentivo e apoio.

À Universidade Federal do Pará e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, pela oportunidade de acesso à educação e as condições propícias para realizar minha pesquisa e elaborar minha dissertação.

Ao meu orientador, Wilson Negrão Macêdo, por sua compreensão, paciência e oportunidade para a realização da minha dissertação. Também estendo meu agradecimento à equipe do GEDAE, pelo ambiente propício para a concretização da pesquisa.

De maneira especial, agradeço ao meu noivo, Thiago, cujo suporte e conforto foram fundamentais durante todo o período da minha pesquisa.

À minha família, avó Edna, prima Isabel e tia Rilene, pelo apoio ao longo da minha trajetória.

Ao meu falecido tio, Rinaldo, que partiu precocemente e deixa muitas saudades.

Ao meu amigo, Luiz, pelo apoio à minha trajetória durante o mestrado.

Ao Orlando Lemos, Luana, Yan, Ivan, Professor Galhardo e Professor Claudomiro, por toda a ajuda indispensável para a elaboração da dissertação.

Aos meus amigos, agradeço o suporte, apoio e pelos desafios enfrentados juntos.

Por fim, expresso meu agradecimento a todos que contribuíram direta e indiretamente para a realização da minha pesquisa.

RESUMO

O sistema fotovoltaico de bombeamento representa uma solução para proporcionar acesso à água potável em comunidades remotas da região amazônica, seja para consumo humano ou para a irrigação agrícola, em áreas com limitações de fornecimento elétrico pela concessionária local. Um componente central desse sistema é a motobomba, encarregada de fazer a sucção do fluido e conduzi-lo por meio de um sistema de tubulação até o destino desejado, e está frequentemente associada a um dispositivo de condicionamento de potência. Este age como um conversor de corrente contínua para alternada e pode integrar um mecanismo de rastreamento do ponto de máxima potência do gerador fotovoltaico. No entanto, em sistemas fotovoltaicos, é comum que a motobomba opere em faixas de frequência abaixo da nominal, o que resulta em um rendimento inferior, em comparação com situações cujo fornecimento de energia é constante pela rede elétrica local. Diante disso, o presente estudo propõe uma abordagem baseada em equações teóricas dos componentes do sistema, com o objetivo de prever um ponto de operação otimizado da motobomba, por meio dos fatores que afetam o desempenho do gerador fotovoltaico, como a irradiância. Para isso, o laboratório do Grupo de Estudos e Desenvolvimento de Alternativas Energéticas dispõe de uma bancada de simulação de alturas manométricas, a qual foi empregada neste trabalho para comparar o desempenho de três sistemas fotovoltaicos de bombeamento com as simulações realizada em um código no programa MATLAB, desenvolvido em uma tese de doutorado defendida no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Pará. Os resultados evidenciaram a eficácia da metodologia em indicar um ponto de melhor eficiência desses sistemas, indicando sua aplicabilidade em tipos específicos de sistemas de bombeamento. Embora em algumas situações a operação real tenha apresentado discrepâncias em relação ao previsto, de modo geral, esse modelo se revelou valioso para orientar projetos que visam a implementação de sistemas fotovoltaicos de bombeamento em determinados poços com eficiência energética aprimorada.

Palavras-chave: sistemas fotovoltaicos de bombeamento, operação de motobombas, curvas de eficiência.

ABSTRACT

The photovoltaic pumping system represents a sustainable solution to provide access to potable water in remote communities of the Amazon region, whether for human consumption or agricultural irrigation, in areas with limitations in electrical supply from the local utility company. A central component of this system is the motor pump, responsible for suctioning the fluid and conveying it through a piping system to the desired destination and is often associated with a power conditioning device. This device acts as a converter from direct current to alternating current and may incorporate a mechanism for tracking the maximum power point of the photovoltaic generator. However, in photovoltaic systems, it is common for the motor pump to operate at frequencies below the nominal, resulting in lower efficiency compared to situations where energy supply is constant from the local electrical grid. Therefore, this study proposes an approach based on theoretical equations of the system components, aiming to predict an optimized operating point for the pump, considering factors affecting the performance of the photovoltaic generator, such as solar irradiance and temperature. To achieve this, the laboratory of the Study and Development of Alternative Energy Group has a test bench for simulating manometric heights. This was employed in this study to compare the performance of three photovoltaic pumping systems with simulations conducted in a MATLAB program, developed in a doctoral thesis defended in the Graduate Program in Electrical Engineering at the Federal University of Pará. The results highlighted the effectiveness of the methodology in identifying an optimal efficiency point for these systems, suggesting its applicability in specific types of pumping systems. Although in some situations, real-world operation showed discrepancies compared to predictions, overall, this model proved to be valuable for guiding projects aimed at implementing photovoltaic pumping systems in specific wells with enhanced energy efficiency.

Key-Words: Photovoltaic pumping systems, operating points, efficiency curves.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Ilustração de um sistema fotovoltaico de bombeamento.	22
Figura 1.2 – Diagrama de diferentes tipos de configurações de SFB.	24
Figura 1.3 – Curva característica I-V.	26
Figura 1.4 – Diferentes curvas I-V causadas por influência da irradiância.....	26
Figura 1.5 – Diferentes curvas I-V causadas por influência da temperatura da célula.	27
Figura 1.6 – Variação do ponto máximo de potência em detrimento da temperatura de célula e irradiância.	27
Figura 1.7 – Representação de uma instalação hidráulica.....	32
Figura 1.8 – Curva do sistema ou do encanamento.....	34
Figura 1.9 – Curvas características da bomba.....	35
Figura 1.10 – Exemplo de curvas de isorrendimento.	37
Figura 1.11 – Modificação das curvas H-Q e η -Q e PME com a velocidade de rotação.....	38
Figura 1.12 – Configuração típica de um SFB.....	39
Figura 1.13 – Curva de eficiência de um inversor aproximada.....	41
Figura 1.14 – Limitação de potência	41
Figura 1.15 – Curvas típicas da eficiência de motores.....	43
Figura 1.16 – Limitação dos valores de Q e f pelas curvas de isorrendimento.....	50
Figura 2.1 – Bancada de ensaios.	52
Figura 2.2 – Posição das motobombas submersas no interior do reservatório de água.	52
Figura 2.3 – Diagrama do sistema de controle da pressão com o CFW-08 e a motobomba Ebara 4BPS5.....	53
Figura 2.4 – Manômetros digital e analógico.....	54
Figura 2.5 – Solar I-Ve e o SOLAR02.....	55
Figura 2.6 – HT304N (a) e PT300N (b).....	55
Figura 2.7 – Gerador fotovoltaico de 10 módulos SW245 da Solarworld.	56

Figura 2.8 – Curvas I-V e P-V nas faixas de irradiância de 700-900 W/m ² médias dos módulos SW245.	56
Figura 2.9 – Curvas I-V e P-V nas faixas de irradiância de 900-1100 W/m ² médias dos módulos SW245.	57
Figura 2.10 – Curvas I-V e P-V nas faixas de irradiância de 980-1040 W/m ² , ao considerar a distância do cabo elétrico.	58
Figura 2.11 – Gerador fotovoltaico de 20 módulos S55P da Solaris.	59
Figura 2.12 – Esquemático do PowerPad 3945-B conectado ao sistema de bombeamento conectado à rede.	61
Figura 2.13 – Curvas H-Q e η -Q.	62
Figura 2.14 – Representação do conjunto SFB 1.	63
Figura 2.15 – Representação do conjunto SFB 2.	65
Figura 2.16 – Representação do conjunto SFB 3.	65
Figura 2.17 – Diagrama de blocos simples do controlador PID de malha fechada.	67
Figura 2.18 – Diagrama de realimentação do CFW-11 para o controle PID.	67
Figura 2.19 – Ação da tensão fixa com a variação do ponto de máxima potência do GFV em relação a irradiância (a); temperatura (b).	68
Figura 2.20 – Transdutor de tensão SECON.	69
Figura 2.21 – Garra de corrente HR 30.	69
Figura 2.22 – HAS 50 S.	70
Figura 2.23 – Transdutor de vazão (a) e rotâmetros (b).	71
Figura 2.24 – Termoresistor PT1000 B.	71
Figura 2.25 – Sensor de irradiância Spektron 210 atrelado aos módulos Solaris (a); aos módulos SW245 (b).	72
Figura 2.26 – <i>Fieldlogger</i>	72
Figura 2.27 – Programa do <i>Fieldlogger</i>	73
Figura 2.28 – Quadro de distribuição de energia com o disjuntor geral e a chave comutadora.	74

Figura 3.1 – Fluxograma do código utilizado no MATLAB.....	77
Figura 3.2 – Gráfico da irradiância e pressão em 20 mca.	78
Figura 3.3 – Gráfico da irradiância e pressão em 45 mca.	79
Figura 3.4 – Gráfico da irradiância, vazão e tensão medidas e simuladas do SFB 1 em 20 mca.....	80
Figura 3.5 – Gráfico da irradiância, vazão e tensão medidas e simuladas do SFB 1 45 mca.	80
Figura 3.6 – Gráfico da irradiância, potências e eficiências medidas e simuladas do SFB 1 em 20 mca.....	81
Figura 3.7 – Gráfico da irradiância, potências e eficiências medidas e simuladas do SFB 1 em 45 mca.....	82
Figura 3.8 – Limitação de potência do controlador SFB 1 em 20 mca (a); 45 mca (b).	82
Figura 3.9 – Gráfico da irradiância, potências e vazões medidas e simuladas do SFB 1, considerando a limitação de potência, em 20 mca.	83
Figura 3.10 – Gráfico da irradiância, potências e vazões medidas e simuladas do SFB 1, considerando a limitação de potência, em 45 mca.	83
Figura 3.11 – Comparação das curvas de eficiência do SFB 1.	84
Figura 3.12 – Comparação das vazões e tensões do SFB 1 com a adição da limitação.....	86
Figura 3.13 – Comparação das potências e eficiências do SFB 1 com a adição da limitação.....	86
Figura 3.14 – Curva de eficiência do SFB 1 para 45 mca com 9 módulos.	87
Figura 3.15 – Comparação da vazão e tensão medidas e simuladas do SFB 2 em 25 mca.....	88
Figura 3.16 – Comparação da vazão e tensão medidas e simuladas do SFB 2 em 40 mca.....	88
Figura 3.17 – Comparação da potência e eficiência do sistema medidas e simuladas do SFB 2 em 25 mca.....	89
Figura 3.18 – Comparação da potência e eficiência do sistema medidas e simuladas do SFB 2 em 40 mca.....	90
Figura 3.19 – Limitação de potência do controlador SFB 2 em 25 mca (a); 40 mca (b).....	91
Figura 3.20 – Comparação das potências e vazões medidas e simuladas do SFB 2, considerando a limitação de potência, em 25 mca.	91

Figura 3.21 – Comparação das potências e vazões medidas e simuladas do SFB 2, considerando a limitação de potência, em 40 mca.	92
Figura 3.22 – Comparação das curvas de eficiência do SFB 2.	92
Figura 3.23 – Comparação das vazões e tensões do SFB 2 para 40 mca com a adição da limitação.	93
Figura 3.24 – Comparação das potências e eficiências do SFB 2 para 40 mca, com a adição da limitação.....	94
Figura 3.25 – Comparação das eficiências e potências medidas e simuladas do SFB 2.....	94
Figura 3.26 – Comparação das vazões e tensões do SFB 3 em 20 mca.	95
Figura 3.27 – Comparação das vazões e tensões do SFB 3 em 40 mca.	96
Figura 3.28 – Comparação das potências e eficiências do SFB 3 em 20 mca.	97
Figura 3.29 – Comparação das potências e eficiências do SFB 3 em 40 mca.	97
Figura 3.30 – Curvas de eficiência do sistema no SFB 3.....	98
Figura 4.1 – Gráfico de irradiância e η_s em 31, 36 e 42 mca no dia 5 (a); Eficiências do sistema para $H = \{20:1:45\}$ no dia 5 (b).	103
Figura 4.2 – Gráfico de irradiância e η_s em 31, 36 e 42 mca no dia 6 (a); Eficiências do sistema para $H = \{20:1:45\}$ no dia 6 (b).	104
Figura 4.3 – Distribuição de faixas de frequências para diferentes alturas manométricas do dia 5 e 6.....	105
Figura 4.4 – Curvas do sistema do PMES para o SFB 1 e 2.....	106
Figura 4.5 – Gráfico de irradiância e η_s em 22 e 42 mca no dia 3 (a); Eficiências do sistema para $H = \{20:1:45\}$ no dia 3 (b).....	109
Figura 4.6 – Distribuição de faixas de frequências para o PMES do dia 3.....	110
Figura 4.7 – Curvas do sistema do PMES e PME para o SFB 3.....	111

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Comparação dos parâmetros elétricos do GFV SW245.	57
Tabela 2.2 – Parâmetros elétricos do GFV SW245 considerando as perdas com o cabo..	58
Tabela 2.3 – Parâmetros elétricos do GFV S55P.....	59
Tabela 2.4 – Pontos de operação nominais da Leão 4R5PA.....	59
Tabela 2.5 – Valores dos coeficientes relacionados às perdas do motor para a curva de 1 HP.....	60
Tabela 2.6 – Pontos de desempenho medidos da Leão 4R5PA para cada altura manométrica.	62
Tabela 2.7 – Valores das constantes para a motobomba de referência.....	63
Tabela 2.8 – Parâmetros técnicos do <i>drive</i> solar Integraltec IVS 100.	64
Tabela 2.9 – Parâmetros técnicos do <i>drive</i> solar Intelbras DS 3220.....	64
Tabela 2.10 – Parâmetros técnicos do conversor de frequência WEG CFW-11.....	66
Tabela 3.1 – Características nominais da motobomba Leão 4R5-PA geradas por cálculos, por meio das informações obtidas.	76
Tabela 3.2 – Parâmetros elétricos do GFV SW245 considerando as perdas com o cabo..	85
Tabela 3.3 – Parâmetros elétricos do GFV SW245 considerando as perdas com o cabo..	93
Tabela 4.1 – Valores de PMES obtidos em diferentes dias para o GFV 8 módulos e com limitação de potência.	101
Tabela 4.2 – Valores de PMES obtidos em diferentes dias para o GFV 8 módulos e sem limitação de potência.	101
Tabela 4.3 – Valores de PMES obtidos em diferentes dias para o GFV com 9 e 10 módulos e com limitação de potência.....	107
Tabela 4.4 – Valores de PMES obtidos em diferentes dias para o SFB 3.	108

LISTA DE ABREVIACÕES E SIGLAS

AM	Massa de ar
BEP	<i>Best Efficiency Point</i>
c.a.	Corrente alternada
c.c.	Corrente contínua
CF	Conversor de frequência
DCP	Dispositivo de condicionamento de potência
f	Frequência
f_N	Frequência nominal
FV	Fotovoltaico
FS	Fator de serviço
FP	Fator de potência
g	Aceleração da gravidade
G	Irradiância incidente
GEDAE	Grupo de Estudos e Desenvolvimento de Alternativas Energéticas
GFV	Gerador fotovoltaico
G_{REF}	Irradiância incidente de referência
H	Altura manométrica
H_D	Altura dinâmica
H_E	Altura estática
H_f	Altura manométrica para a frequência nominal
H-Q	Altura manométrica <i>versus</i> vazão
H_R	Altura de rebaixamento
HSP	Horas de sol pleno
i	Número de um determinado elemento de uma matriz
I	Corrente elétrica
IHM	Interface homem-máquina
I_{SC}	Corrente de curto-circuito
I_{MP}	Corrente de máxima potência
I-V	Corrente <i>versus</i> tensão
j	Número de um determinado elemento de uma matriz
J	Perdas na tubulação
k	Coefficiente de perdas da tubulação

k_0	Coeficiente de perda do motor
k_1	Coeficiente de perda do motor
k_2	Coeficiente de perda do motor
k_{i0}	Coeficiente de perda sem o carregamento do inversor
k_{i1}	Coeficiente de perda linear do inversor
k_{i2}	Coeficiente de perda de Joule do inversor
LF	Fator de carga
m	Número de elementos de uma matriz
n	Número de elementos de uma matriz
N	Velocidade de rotação
p	Potência normalizada de saída do motor
P_B	Potência da bomba
P_{ENTRADA}	Potência de entrada
P_{FV}	Potência do gerador fotovoltaico
P_H	Potência hidráulica
p_i	Potência normalizada de saída do inversor
PI	Proporcional integral
PID	Proporcional integral derivativo
P_M	Potência do motor
PME	Ponto de máxima eficiência
PMES	Ponto de máxima eficiência solar
P_{MP}	Potência teórica do gerador fotovoltaico
P_{MP, REF}	Potência máxima de referência do gerador
P_{MRN}	Potência requerida pelo motor para a operar em frequência nominal
P_{NOM}	Potência nominal da motobomba
P_{SAÍDA}	Potência de saída
P-V	Potência <i>versus</i> tensão
Q	Vazão
Q_f	Vazão em frequência nominal
SFB	Sistema fotovoltaico de bombeamento
SPMP	Seguidor do ponto de máxima potência
STC	<i>Standart test conditions</i> (Condições padrão de ensaio)
T_A	Temperatura ambiente

T_C	Temperatura de operação de célula
$T_{C, REF}$	Temperatura de operação de célula de referência
UFPA	Universidade Federal do Pará
V	Tensão elétrica
V_{CA}	Tensão de corrente alternada
V_{CC}	Tensão de corrente contínua
V_{MP}	Tensão de máxima potência
V_{OC}	Tensão de circuito aberto
W_P	<i>Watt</i> -pico
α_{SC}	Coefficiente de temperatura para a corrente do módulo fotovoltaico
β_{OC}	Coefficiente de temperatura para a tensão do módulo fotovoltaico
ΔT	Variação da temperatura do módulo e da temperatura em STC
γ_{MP}	Coefficiente de temperatura para a potência do módulo fotovoltaico
η	Eficiência
η_B	Eficiência da bomba
η_{DCP}	Eficiência do dispositivo de condicionamento de potência
η_M	Eficiência do motor
η_{MB}	Eficiência da motobomba
η_S	Eficiência do sistema
η_{SPMP}	Eficiência do seguidor do ponto de máxima potência
ρ	Massa específica da água

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	19
1 CONCEPÇÕES GERAIS DOS COMPONENTES DE SISTEMAS FOTVOLTAICOS DE BOMBEAMENTO	22
1.1 Conceitos básicos de sistemas fotovoltaicos de bombeamento	22
1.2 Gerador fotovoltaico.....	24
1.2.1 Características gerais	24
1.2.2 Curvas características de geradores fotovoltaicos	25
1.2.3 Influências na curva I-V	26
1.3 Dispositivo de condicionamento de potência.....	28
1.3.1 Conversores de Frequência (CF)	30
1.4 Motores de indução trifásicos	30
1.5 Conceitos de bombas	31
1.5.1 Curvas características do sistema de bombeamento	32
1.5.2 Grandezas e curvas características de bombas centrífugas.....	34
1.6 A aplicação das turbobombas em sistemas fotovoltaicos.....	37
1.7 Fatores que influenciam na determinação do ponto máximo de eficiência solar (PMES).....	39
1.8 Estimação das eficiências dos componentes do SFB.....	40
1.8.1 Eficiência do DCP (η_{DCP})	40
1.8.2 Eficiência do motor (η_M)	42
1.8.3 Eficiência da bomba (η_B) e da motobomba (η_{MB}).....	44
1.8.4 Eficiência do sistema (η_S).....	45
1.8.5 Eficiência de SPMP (η_{SPMP})	45
1.9 Simulação do MATLAB para a aquisição do PMES	45
1.9.1 Inserção das características do sistema e da motobomba	46

1.9.2	Inserção das características do gerador fotovoltaico e do dispositivo de condicionamento de potência.....	46
1.9.3	Aquisição da potência da bomba	47
1.9.4	Aquisição das características da motobomba	48
1.9.5	Influência das curvas de isorrendimento aos valores de vazão e frequência de rotação.....	49
1.9.6	Aquisição do PMES.....	50
2	DESCRIÇÃO DOS SISTEMAS FOTOVOLTAICOS DE BOMBEAMENTO E DA BANCADA	51
2.1	Sistema de controle de pressão da bancada de ensaios	51
2.2	Geradores fotovoltaicos.....	54
2.2.1	Gerador fotovoltaico SolarWorld SW245	55
2.3	Motobomba	59
2.3.1	Determinação da curva de eficiência do motor	60
2.3.2	Determinação da curva de eficiência da bomba	60
2.4	Configurações dos sistemas fotovoltaicos de bombeamento.....	63
2.4.1	Configuração do SFB 1.....	63
2.4.2	Configuração do SFB 2.....	64
2.4.3	Configuração do SFB 3.....	65
2.5	Sistema de medição e aquisição de dados da bancada	68
2.5.1	Transdutor de tensão.....	69
2.5.2	Transdutores de corrente.....	69
2.5.3	Transdutor de vazão e rotâmetros.....	70
2.5.4	Sensor para medição de temperatura	71
2.5.5	Sensores de irradiância	71
2.5.6	Equipamento de registro de dados	72
2.5.7	Dispositivos de proteção	73

3 ANÁLISE E AVALIAÇÃO DA METODOLOGIA APLICADA E COMPARAÇÃO COM OS ENSAIOS PRÁTICOS	75
3.1 Esquemático da metodologia	76
3.2 Rendimento do controle de pressão da bancada de ensaios	78
3.3 Metodologia aplicada ao SFB 1	79
3.3.1 Comparação com a simulação do MATLAB	79
3.3.2 Ensaio com o GFV de nove módulos	85
3.4 Metodologia aplicada ao SFB 2	87
3.4.1 Ensaio com o GFV de dez módulos.....	93
3.5 Metodologia aplicada ao SFB 3	95
4 APLICAÇÃO DA METODOLOGIA PARA OBTENÇÃO DO PONTO DE MELHOR EFICIÊNCIA SOLAR	99
4.1 Determinação dos dados de irradiância e temperatura de operação da célula	99
4.2 Definição do PMES para o SFB 1 e 2.....	100
4.2.1 Simulação com o gerador de oito módulos SW245.....	100
4.2.2 Simulação com o gerador de nove e dez módulos SW245.....	107
4.3 Definição do PMES para o SFB 3	108
CONCLUSÃO.....	112
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	116
APÊNDICE A: PERFIS DE IRRADIÂNCIA E TEMPERATURA DE CÉLULA DAS SIMULAÇÕES DO PMES DOS SFB 1 E 2	123
APÊNDICE B: PERFIS DE IRRADIÂNCIA E TEMPERATURA DE CÉLULA DAS SIMULAÇÕES DO PMES DO SFB 3	125

INTRODUÇÃO

O acesso à água potável é um direito universalmente reconhecido e vital para a humanidade, conforme estabelecido pela Resolução 64/292/2010 da Organização das Nações Unidas (ONU). No Brasil há a Lei N° 11.445 que estabelece a universalização no acesso ao saneamento básico, que inclui o abastecimento de água (Brasil, 2007). No entanto, essa premissa é frequentemente questionada diante da realidade global, onde a escassez desse recurso essencial é uma triste realidade (Bordalo, 2022; Souza *et al.*, 2012). Esse cenário é agravado quando é levado em conta a importância crítica da água tanto para a saúde, como para a agricultura e o desenvolvimento sustentável.

A Região Norte, com sua extensa área ocupada pela Floresta Amazônica, abriga duas das maiores bacias hidrográficas do mundo, com capacidade para atender a toda a população brasileira. Portanto, para os residentes dessa região, o acesso a esse recurso abundantemente disponível deveria estar assegurado. No entanto, a realidade contrasta com essa expectativa, com déficits significativos no fornecimento de água potável e saneamento básico, serviços que são fornecidos nos grandes centros urbanos, mas são extremamente precárias nas comunidades remotas e isoladas (Bordalo, 2022; Souza *et al.*, 2012), regiões onde há menor desenvolvimento e acesso à energia elétrica.

A escassez e a falta de acesso a água de qualidade para uma comunidade resultam em sérios problemas, como impactos na saúde pública, no seu desenvolvimento, e impede atividades de pequenos agricultores. Além disso, é crucial entender não apenas a disponibilidade da água, mas também a essencialidade de mecanismos adequados para garantir a distribuição desse recurso com facilidade (Hosoi, 2011). Em vista disso, algumas ideias são apresentadas com o objetivo de melhorar a situação dessas populações, e uma delas é a implementação de sistemas fotovoltaicos (FV), por conta da aquisição de energia elétrica sem depender das concessionárias e com baixos impactos ao meio ambiente.

Este estudo aborda os sistemas fotovoltaicos de bombeamento (SFB) como uma alternativa viável para essas comunidades com restrições de acesso à energia elétrica da rede local, para garantir um mecanismo adequado para água potável de poços. Esses sistemas, que compreendem componentes-chave como geradores fotovoltaicos (GFV), dispositivos de condicionamento de potência (DCP) e motobombas, também representam uma opção sustentável para locais em busca de fontes limpas de energia (World Bank, 2018).

Os SFB podem ser adquiridos de forma conjunta, incluindo o DCP e a motobomba, ou separadamente. Optar pela obtenção dos componentes de forma separada surge como uma

estratégia mais prática, pois facilita a busca no mercado. As motobombas disponíveis oferecem uma ampla variedade de modelos, adequados para diferentes propósitos e níveis de vazão. Muitas delas apresentam curvas de desempenho que orientam sobre as faixas ideais de altura manométrica para otimizar o rendimento (Karassik *et al.*, 2001; Santos, 2022).

Entretanto, essas curvas são elaboradas considerando o uso com um sistema de energia convencional, cuja frequência de operação é mantida no seu valor nominal constantemente. Para geradores FV, há o impactado pela variação intermitente da incidência de luz nos módulos FV, afetando a potência disponível para a bomba. Essa variação resulta em uma operação em frequências de rotação diferentes da nominal, e isso afeta o desempenho esperado do SFB que faz uso do ponto máximo de eficiência nominal (PME).

Para contornar esse desafio, foi proposto a aplicação de uma metodologia, a qual foi introduzida por Santos (2022) e Muñoz *et al.* (2015), para obter um novo ponto de operação da motobomba. Essa abordagem se baseia em cálculos matemáticos usando o perfil de irradiância e temperatura de operação da célula para determinar um ponto de operação ideal para a motobomba, considerando as condições climáticas da região. O objetivo é compreender como o clima de uma região influencia o desempenho de um SFB e, a partir disso, indicar qual seria o melhor ponto de instalação de um determinado modelo de motobomba para obter a maior eficiência energética na captação de água.

Nesse estudo, aplicou-se essa metodologia no programa de cálculo computacional MATLAB, a fim de realizar diferentes simulações para obter o ponto de máxima eficiência solar (PMES) de um determinado SFB. No entanto, para garantir a confiabilidade do programa, foi essencial incluir informações precisas sobre o sistema, como as curvas de eficiência de cada componente do SFB. Isso pode ser um desafio, pois essas informações muitas vezes não estão disponíveis publicamente, e as aquisições por meio de medições próprias podem ser inviáveis. Portanto, para contornar essa limitação, foram utilizados valores aproximados obtidos de referências bibliográficas, os quais foram aplicados na programação para iniciar os testes e avaliar a metodologia.

Foram empregados três sistemas fotovoltaicos de bombeamento, com dois geradores fotovoltaicos, três dispositivos de condicionamento de potência e uma única motobomba. Realizaram-se testes operacionais em uma bancada que simula a altura manométrica exercida sobre a motobomba, abrangendo diversos cenários, para analisar o desempenho dos SFB. A metodologia foi então aplicada para comparar os perfis de eficiência com os resultados obtidos nos ensaios.

Todos os experimentos conduzidos neste estudo são realizados em uma altura manométrica constante, excluindo, portanto, poços sujeitos a flutuações significativas em seu nível de água em resposta à vazão da bomba, como é comum em poços tubulares de menor diâmetro. Essas oscilações podem impactar a pressão exercida sobre a bomba. Assim, a pesquisa se direciona para poços escavados de diâmetro mais amplo, como os do tipo amazonas, os quais demonstram maior capacidade de restaurar o nível da água rapidamente diante das variações causadas pela operação de sucção da bomba (Vasconcelos, 2014; Sá e Seemanapalli, 1999).

A pesquisa propõe que a utilização dos cálculos teóricos do funcionamento dos componentes sejam úteis para melhorar o rendimento desses sistemas. Para isso, abordou-se:

- a) No Capítulo 1 a revisão bibliográfica dos sistemas fotovoltaicos de bombeamento, oferecendo uma análise detalhada das diferentes configurações e características de cada equipamento, além de aprofundar nos conceitos das curvas características das bombas e dos pontos ideais de operação;
- b) No Capítulo 2 a descrição minuciosa dos sistemas fotovoltaicos de bombeamento, bem como dos equipamentos utilizados na bancada de ensaios. Isso inclui a explanação sobre os transdutores e o dispositivo de aquisição de dados;
- c) No Capítulo 3 as comparações dos ensaios desses sistemas feitos com a bancada de ensaios no controle da pressão, confrontando os resultados com os obtidos por meio da simulação. Com a avaliação das eficiências do sistema, bem como os perfis de potência e vazão testados;
- d) No Capítulo 4 a aplicação da metodologia para encontrar os pontos de máxima eficiência solar, ao considerar os diferentes cenários apresentados no Capítulo 3;
- e) Na Conclusão a sintetização dos resultados obtidos ao longo do desenvolvimento do trabalho. Além disso, são realizadas avaliações críticas da metodologia empregada, proporcionando sugestões para trabalhos futuros.

1 CONCEPÇÕES GERAIS DOS COMPONENTES DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS DE BOMBEAMENTO

Este capítulo aborda teorias básicas que foram aplicadas neste trabalho, com o conceito de um sistema fotovoltaico de bombeamento típico e seus principais componentes: o gerador fotovoltaico, o dispositivo de condicionamento de potência, e a motobomba, e como suas características influenciam no momento da escolha de um sistema para drenar água do poço. Além disso, é retratado sobre a metodologia para selecionar um ponto de operação otimizado de eficiência a ser utilizado em um sistema por intermédio das teorias e equações que envolvem esses assuntos.

1.1 Conceitos básicos de sistemas fotovoltaicos de bombeamento

Um SFB típico é uma alternativa aos sistemas convencionais de bombeamento, cuja fonte de energia é proveniente da rede elétrica da distribuidora local. Em regiões de baixa transmissão de energia por parte da concessionária, um sistema de bombeamento alimentado pela energia fotovoltaica (FV) se torna uma solução útil para uma pequena população. Ele é composto basicamente por um gerador fotovoltaico, um dispositivo de condicionamento de potência e uma motobomba, com a possibilidade de adicionar um sistema de armazenamento e uma rede de distribuição, por meio das tubulações (Figura 1.1). A água adquirida pode ser usada para irrigação, consumo, sendo de uso coletivo ou individual (Silva, 2019).

Figura 1.1 – Ilustração de um sistema fotovoltaico de bombeamento.



Fonte: Adaptado de World Bank (2018).

A principal vantagem do SFB reside na autonomia em relação ao fornecimento de energia convencional, permitindo sua instalação em locais mais remotos. O GFV absorve a

energia solar e converte em energia elétrica. O DCP, por sua vez, converte a tensão de corrente contínua (c.c.) do barramento do GFV em corrente alternada (c.a.) para a motobomba c.a., geralmente em frequência variável, ou apenas ajusta a tensão para uma motobomba de tensão contínua.

No início de um projeto de instalação de um SFB, avalia-se a demanda de água da população. Os principais fatores que afetam no volume da água bombeada em um sistema fotovoltaico de bombeamento são:

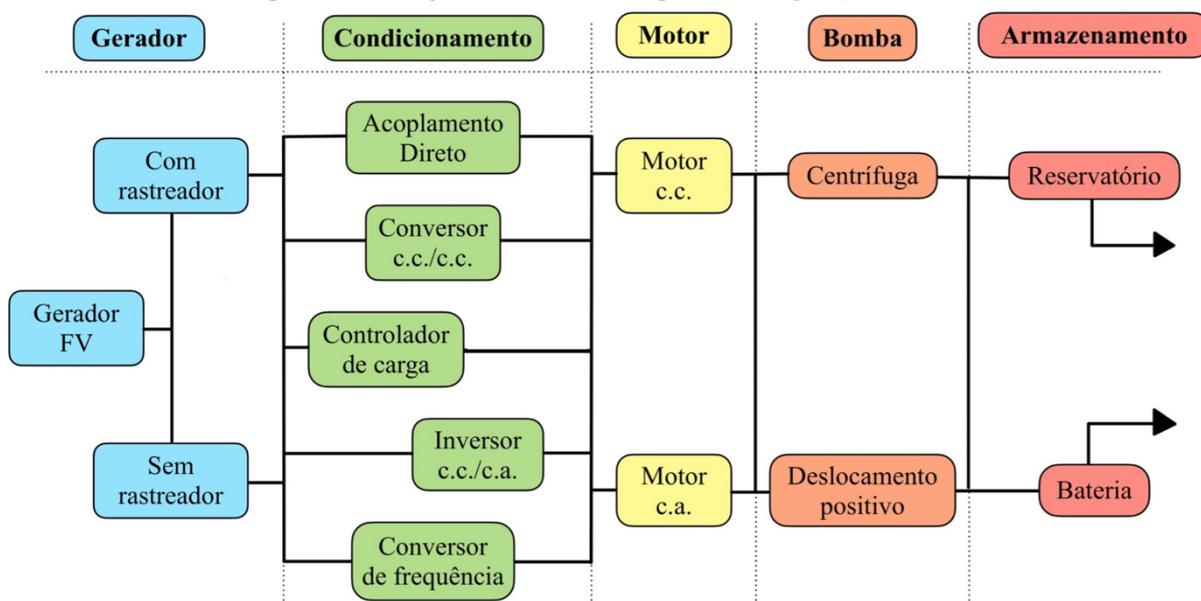
- a) A eficiência de conversão de energia do DCP;
- b) A eficiência da motobomba;
- c) A pressão exercida no ponto de instalação da motobomba, que acarreta diferentes desempenhos de acordo com a sua curva de desempenho (ou performance);
- d) A rede hidráulica (tubulações e conexões);
- e) As especificações do GFV escolhido (corrente e tensão);
- f) As propriedades naturais da região (temperatura ambiente e irradiância).

Importante notar que as regiões onde possuem maiores níveis de incidência de irradiância usualmente possuem as maiores temperaturas, e vice-versa, e isso afeta o rendimento do GFV, como é mencionado adiante. Além disso, essas propriedades têm características intermitentes, ou seja, são influenciadas conforme as mudanças na posição do sol ao longo do dia, dos sombreamentos causados por passagens de nuvens, entre outros. Dessa forma, há momentos em que haverá pouca ou nenhuma vazão de água e para contornar isso, instalam-se sistemas de armazenamento para atender a população durante a baixa capacidade do GFV, com duas opções principais: bancos de baterias e reservatórios de água (World Bank, 2018).

Os bancos de baterias possuem a capacidade de armazenamento de energia elétrica, assegurando a disponibilidade de água por períodos de menor desempenho do gerador. Todavia, geralmente, não são empregados devido aos altos custos a longo prazo, uma vez que são dispositivos dispendiosos e com vida útil limitada, requerendo substituições periódicas. Por esse motivo, comumente são usufruídos os reservatórios de água, mais econômicos, e que cumprem o objetivo no fornecimento de água em momentos de baixa luminosidade solar. O dimensionamento do reservatório deve ser feito corretamente para garantir a demanda de toda a população, a depender das condições climáticas da região, da rotina e tempo de autonomia (Morales, 2016; Pinho e Galdino, 2014).

Para atender estas variedades de condições, o SFB dispõe de diferentes configurações, cuja escolha depende do objetivo do sistema, da disponibilidade financeira, de como será feita a sucção da água e entre outros, as quais serão analisadas pelo projetista. A Figura 1.2 exibe alguns diferentes exemplos de arranjos que podem ser utilizados para compor um sistema fotovoltaico de bombeamento, como a inclusão ou não de um rastreador da posição solar, além das diversas opções de uso dispositivos de condicionamento de potência e motobombas (Morales, 2016), a fim de melhor se adequar a situação imposta.

Figura 1.2 – Diagrama de diferentes tipos de configurações de SFB.



Fonte: Adaptado de Morales (2016).

Neste trabalho, algumas configurações foram mencionadas, porém, a metodologia utilizada na pesquisa foi direcionada para três diferentes sistemas compostos que incluem: dois geradores FV sem rastreador da posição solar, três dispositivos de condicionamento de potência e apenas uma motobomba centrífuga.

1.2 Gerador fotovoltaico

1.2.1 Características gerais

O GFV é uma associação de módulos de mesmas características térmicas e elétricas, cuja composição elementar é a célula fotovoltaica, responsável por transformar a energia contida na radiação proveniente do Sol em elétrica, por meio de materiais semicondutores, conhecido como efeito fotovoltaico (Zilles *et al*, 2012). O Silício é o material mais comum a ser utilizado na composição dessas células, por ser um material progressivamente estudado e utilizado em tecnologias de microeletrônica, além de ser o segundo elemento mais abundante no mundo.

Um arranjo de dezenas de células compõe esses painéis ou módulos solares. A forma com que eles são associados está sujeito aos objetivos e requisitos do conjunto DCP e motobomba utilizados, através de ligações em série, em paralelo, ou uma combinação dos dois. Quando combinados em série, o GFV fornece uma tensão somada das tensões individuais dos módulos, porém com a mesma corrente de um painel solar. Em uma configuração apenas em paralelo, a situação se inverte, e a corrente é proporcional a soma das correntes de cada módulo, mas com a mesma tensão unitária. Não é intuito do trabalho explorar mais detalhes acerca da conversão fotovoltaica e características das células, apenas algumas informações para esclarecer o assunto tratado.

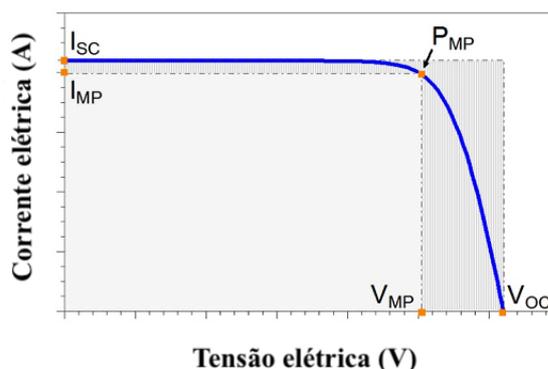
O gerador pode ser instalado em uma estrutura fixa ou móvel com a tecnologia de rastreamento do movimento solar – para maximizar o rendimento do sistema – o qual permite posicionar o gerador para seguir sua trajetória diária, ideal para áreas com latitudes mais altas, com o ajuste na angulação nos períodos sazonais. Como desvantagem, a tecnologia encarece o SFB, e deverá ter um espaço maior para permitir o movimento das do GFV (Pinho e Galdino, 2014).

1.2.2 Curvas características de geradores fotovoltaicos

Uma forma de analisar o desempenho dos GFV é o levantamento de suas curvas I-V (corrente *versus* tensão), pois por meio delas é possível extrair as características mais importantes dos módulos e de geradores fotovoltaicos: a potência máxima nominal (P_{MP}), a tensões de circuito aberto (V_{OC}) e de máxima potência (V_{MP}), e as correntes de curto-circuito (I_{SC}) e de máxima potência (I_{MP}), cujo conhecimento desses atributos influenciam na escolha do GFV mais adequado para um sistema qualquer.

Como explica Zilles *et al.* (2012), esses parâmetros são fornecidos pelas fabricantes, mediante testes padronizados. Nas condições padrão de teste (STC) os valores são definidos para uma irradiância de 1000 *Watt* por metro quadrado (W/m^2), temperatura de célula de 25 graus Celsius ($^{\circ}C$) e distribuição espectral equivalente a massa de ar (AM) de 1,5. A potência nominal é adquirida por meio do produto de V_{MP} e I_{MP} . A Figura 1.3 ilustra uma curva I-V típica de um módulo fotovoltaico. A área cinza sólida representa a potência máxima do GFV.

Figura 1.3 – Curva característica I-V.

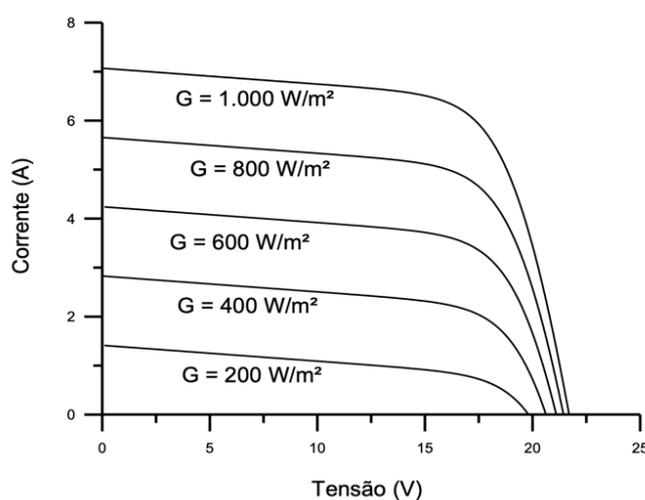


Fonte: Pinho (2014).

1.2.3 Influências na curva I-V

Embora a STC seja o parâmetro mais utilizado para retratar as características do gerador, ela não representa a situação real do ambiente onde ele está instalado. A irradiância incidente e a temperatura do ambiente influem na temperatura das células fotovoltaicas. Para 1000 W/m^2 , como é comentado em Zilles *et al.* (2012), a temperatura dos módulos frequentemente está próxima ou superior a $50 \text{ }^\circ\text{C}$ e isso acarreta a redução da potência gerada. A corrente de um GFV é diretamente proporcional a incidência da irradiância, com um aumento linear (Figura 1.4), porém a tensão pouco se modifica, que varia de forma logarítmica, como foi mencionado por Maranhão (2015) no trabalho de Villalva e Gazoli (2013).

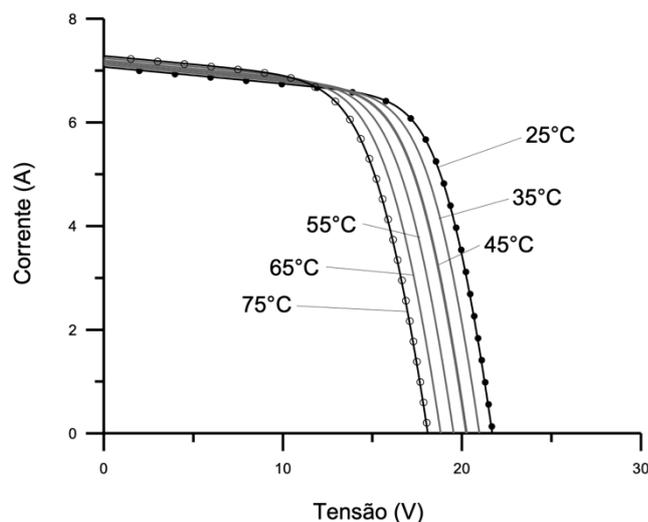
Figura 1.4 – Diferentes curvas I-V causadas por influência da irradiância.



Fonte: Pinho (2014).

No caso da temperatura da célula, o quadro se inverte. Nota-se na Figura 1.5 que há uma queda de tensão conforme a temperatura das células fotovoltaicas aumentam. Em contrapartida, há um modesto acréscimo na corrente do GFV à medida que a sua temperatura sobe, mas que não compensa com as perdas na potência por conta da redução de tensão (Pinho, 2014).

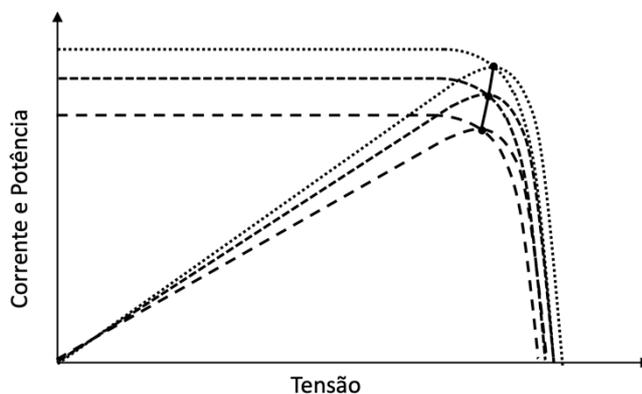
Figura 1.5 – Diferentes curvas I-V causadas por influência da temperatura da célula.



Fonte: Pinho (2014).

Como resultado, o ponto de máxima potência é continuamente ajustado à medida que os níveis de temperatura e a irradiância alteram ao longo do dia. Logo, para manter o desempenho otimizado do gerador fotovoltaico, é essencial rastrear constantemente o ponto de máxima potência na curva I-V de acordo com as condições ambientais, para a potência do gerador FV ficar próximo ao P_{MP} , como é visto na Figura 1.6, na curva I-V e P-V (potência *versus* tensão). Se o ponto de atuação do GFV for fixo, há redução na eficiência do sistema.

Figura 1.6 – Variação do ponto máximo de potência em detrimento da temperatura de célula e irradiância.



Fonte: Maranhão (2015).

Os coeficientes de temperatura representam essas variações características na tensão, corrente e potência dos módulos fotovoltaicos. A depender do material utilizado para a composição, haverá diferentes valores das taxas de variação de temperatura (ΔT). Em vista disso, é imprescindível para o projetista levar em consideração essas informações para a instalação do GFV. Uma localidade predominantemente fria apresenta módulos com baixas temperaturas, porém com a incidência de irradiância mais limitada. Por outro lado, em regiões com maior exposição à luminosidade solar, o clima tende a ser mais quente.

Há três diferentes coeficientes de temperatura associados às células: o coeficiente da variação da corrente de curto-circuito (α_{SC}), da variação da tensão de circuito aberto (β_{OC}), e o da variação de potência máxima (γ_{MP}), o qual é a junção dos dois primeiros. Apenas o α_{SC} possui uma variação positiva, enquanto os dois últimos diminuem conforme o aumento da temperatura das células.

O cálculo de γ_{MP} é o quociente da taxa de variação da potência máxima com ΔT , vista na Equação (1.1):

$$\gamma_{MP} = \frac{\Delta P_{MP}}{\Delta T} \times \frac{1}{P_{MP}} \left[\frac{1}{^{\circ}\text{C}} \right] \quad (1.1)$$

O γ_{MP} é um coeficiente negativo e possui valores distintos em função de diferentes tecnologias e materiais confeccionados nas células fotovoltaicas. Para as células de silício monocristalino e policristalino, constatam-se valores típicos entre $-0,0035$ e $-0,005$ $1/^{\circ}\text{C}$ ou $-0,35$ e $-0,5$ $\%/^{\circ}\text{C}$, e são aproximadamente constantes para quaisquer condições de operação para os módulos fotovoltaicos (Zilles *et al.*, 2012; Santos, 2022), com os coeficientes de temperatura fornecidos nas informações de placa.

A partir do coeficiente γ_{MP} , é possível calcular a máxima potência do GFV, P_{MP} , mostrada na Equação (1.2):

$$P_{MP} = P_{MP, REF} \times \frac{G}{G_{REF}} \times [1 + \gamma_{MP} \times (T_C - T_{C, REF})] \text{ [W]} \quad (1.2)$$

onde G é a irradiância incidente no GFV; T_C é a temperatura de operação equivalente das células do GFV; P_{MP} é a potência resultante; $P_{MP, REF}$, G_{REF} e $T_{C, REF}$ são os valores de referência da potência nominal do gerador, irradiância e temperatura de célula do GFV, respectivamente, associados às condições de STC.

1.3 Dispositivo de condicionamento de potência

O DCP é um conjunto de circuitos eletrônicos de potência que otimizam o controle da energia do GFV e seu aproveitamento para determinada aplicação. Com melhoras na qualidade e eficiência na entrega de energia ao equipamento (Pinho *et al.*, 2008), a exemplo do bombeamento de água da motobomba. Conforme mencionado, existem diversas maneiras de controlar a motobomba, incluindo a possibilidade de dispensar o seu uso e conectar diretamente o gerador à motobomba (SFB de acoplamento direto), o que depende do tipo de motor da bomba. O dispositivo pode estar integrado à carcaça da motobomba ou separado em um compartimento externo (Brito, 2006). Neste trabalho, o foco da discussão recai sobre a operação desses dispositivos em motobombas centrífugas de corrente alternada trifásica.

O DCP pode incluir um inversor c.c./c.a. que, nos sistemas fotovoltaicos de bombeamento, converte a tensão contínua do GFV para a tensão alternada da motobomba, com frequência fixa e controle da corrente de saída, sendo desejável o suprimento em conformidade com padrões de qualidade de energia (Pomilio *et al.*, 2021). No entanto, a conversão não é o suficiente para garantir ótimo rendimento do conjunto DCP e motobomba, pois como foi citado anteriormente, a irradiância e temperatura não são fixas, e mudam constantemente a máxima potência na curva I-V do GFV.

Nesse sentido, com o objetivo de alcançar o P_{MP} , atribui-se um circuito seguidor do ponto de máxima potência (SPMP), para rastrear na curva I-V o ponto otimizado. O algoritmo compara constantemente diferentes pontos de potência – em intervalos de tempo definidos, através da multiplicação da tensão e corrente, e realiza os ajustes (Santos, 2022). Explicado no trabalho de Pereira, Souza e Santos (2016), na atualidade, há duas principais estratégias de SPMP:

- a) Perturba e observa: como é descrito no nome, o circuito efetua uma contínua perturbação na tensão do GFV para um sentido, e, por meio da observação da variação de potência e de tensão, o rastreamento se desloca para a esquerda ou a direita da curva P-V;
- b) Condutância incremental: O P_{MP} é alterado pela comparação entre as condutâncias instantânea e incremental do arranjo.

Há também outros métodos como o controle *fuzzy*, que utiliza o comportamento da irradiância para o controle do ponto de máxima potência.

Existem vários modelos de DCP no mercado, muitos deles próprios para sistemas fotovoltaicos de bombeamento, conhecidos como *drives* ou controladores solares, que trabalham com frequências variáveis e incluem algumas medidas de segurança, além de um circuito SPMP. Há modelos com instalação simples, com poucas opções de parametrizações, como também os mais complexos, com maior gama de configurações para atender a diferentes modelos de motobombas. Nos manuais do usuário, há a descrição do dimensionamento do gerador fotovoltaico, que precisa atingir uma potência e tensão do barramento c.c. mínima para o funcionamento adequado da motobomba instalada e varia de acordo com sua potência nominal.

Alguns controladores podem ser adquiridos mediante a *kits*, que incluem a motobomba, e geralmente não precisam de nenhuma configuração. Como foi explicado em Silva (2019) e Melo (2004), por conta da limitação do uso, são equipamentos mais baratos e atualmente estão mais fáceis de encontrar no mercado. Entretanto, quaisquer problemas nos *kits*, seja no DCP ou

na motobomba, o conjunto é todo comprometido, devido a dependência entre os dois dispositivos, e acarreta dificuldades para substituição dos equipamentos separadamente.

1.3.1 Conversores de Frequência (CF)

É um dispositivo eletrônico mais abundante no mercado, aplicado em diferentes finalidades, com a mesma capacidade de transformar a tensão e frequência fixas em variáveis. Ele controla a velocidade e o torque do motor de indução trifásico, com atuação direta na sua frequência de rotação, a partir da alimentação da tensão alternada da rede elétrica (conversor c.a.-c.a.) ou da tensão contínua de um gerador fotovoltaico (conversor c.c.-c.c.). Todavia seu destaque reside nas diversas aplicações e na compatibilidade com diferentes tipos de motores, tornando-o amplamente versátil no setor industrial. Isso os diferencia significativamente dos controladores fotovoltaicos, além de apresentarem maior confiabilidade, pois são equipamentos consolidados no mercado, oferecendo uma variedade superior de modelos e fabricantes (Santos, 2015; Silva, 2019).

Por meio da parametrização, são ajustadas as informações da motobomba pelo usuário para diferentes formas de controle, a fim de obter o melhor desempenho do SFB, além de adicionar medidas de segurança específicas de proteção para o motor. Por não ser um dispositivo construído especificamente para a atuação em sistemas fotovoltaicos de bombeamento, o CF é mais difícil de configurar, e as tecnologias de SPMP do GFV podem estar indisponíveis. Além disso, como é um produto voltado à indústria, sua tensão de alimentação comumente está em valores nominais (127 V, 220 V, 380 V e entre outros). Um conversor de frequência com tensão alternada elevada resulta em níveis mais altos de tensão no barramento c.c., podendo exigir a adição de módulos em série em maior quantidade no GFV. Isso pode resultar na superação da potência necessária para o sistema.

1.4 Motores de indução trifásicos

Dentre diversos tipos de motores, para um bom funcionamento de bombeamento de água, é requerido que o motor tenha capacidade de manter a vazão da bomba. Basicamente há duas categorias para a escolha de um motor: os de corrente contínua e os de corrente alternada. De acordo com Shrestha, Jha e Karki (2014), os motores c.c. possuem eficiência elevada, mas costumam ser de baixas potências, além do maior custo para adquiri-los. Eles são requeridos principalmente em situações específicas de acoplamento direto com o gerador fotovoltaico, dispensando o uso de conversores. Os motores c.a. geralmente são mais baratos, confiáveis e com disponibilidade maior no mercado, porém possuem maiores perdas de energia, principalmente com potência menor que 1 *kiloWatt* (kW).

Majoritariamente motores c.a. usam três fases, e são disponibilizados em síncronos e assíncronos (ou de indução). Ambos são usados para bombeamento, no entanto, o motor de indução é mais adequado para sistemas de baixo torque, o qual exige menor corrente de partida, e com utilização de velocidades variáveis (Karassik *et al.*, 2001). Para esta pesquisa, as motobombas usadas possuem motores de indução, sendo uma de 3 cavalos-vapor (cv) e outra de 1 cv. As unidades mais comuns de potência além do cavalo-vapor é o *Watt* (W) e o *Horsepower* (HP), com a conversão mostrada em (1.3).

$$1 \text{ cv} = 735,5 \text{ W} = 0,986 \text{ HP} \quad (1.3)$$

1.5 Conceitos de bombas

Macintyre (1997) define bombas como geratrizes, pois realizam o deslocamento de um fluido por escoamento, a partir da transformação do trabalho mecânico em energia hidráulica, por uma tubulação. A ação mecânica cria um vácuo na carcaça da bomba, onde a pressão atmosférica atua para forçar a entrada do líquido pela tubulação de sucção. As bombas são classificadas em dois grandes grupos: as de deslocamento positivo e as centrífugas. A principal diferença está na técnica feita para transformar o trabalho em energia hidráulica.

- a) Bombas de deslocamento positivo ou hidrostáticas: funcionam com movimentos mecânicos sucessivos de um êmbolo, e força a transferência de um volume fixo do fluido por vez, no mesmo sentido. Essas bombas são capazes de bombear líquidos em uma vazão relativamente constante, independente da viscosidade e pressão do líquido. Assim, elas são adequadas para pressões elevadas, porém para níveis baixos ou médios de vazão. A eficiência é diretamente proporcional a altura manométrica. Todavia, como explica Pinho e Galdino (2014), esse tipo de bomba não possui características adequadas para o sistema fotovoltaico tal como as bombas centrífugas, por apresentar um torque de partida mais elevado, em que precisa de controlador específico para proporcionar uma corrente na curva I-V do GFV;
- b) Bombas centrífugas, turbobombas ou hidrodinâmicas: são bombas de deslocamento não-positivo, cuja movimentação do fluido ocorre pela ação da força centrífuga, em decorrência da rotação de um eixo, onde é acoplado um rotor dotado de palhetas, e como consequência do fenômeno da força centrífuga, o fluido é forçado a se deslocar do centro para a periferia (Brasil, 2010). No geral, possuem vazão elevada, porém em baixas alturas manométricas, e à medida que a pressão se eleva, a resistência aumenta e o seu poder de

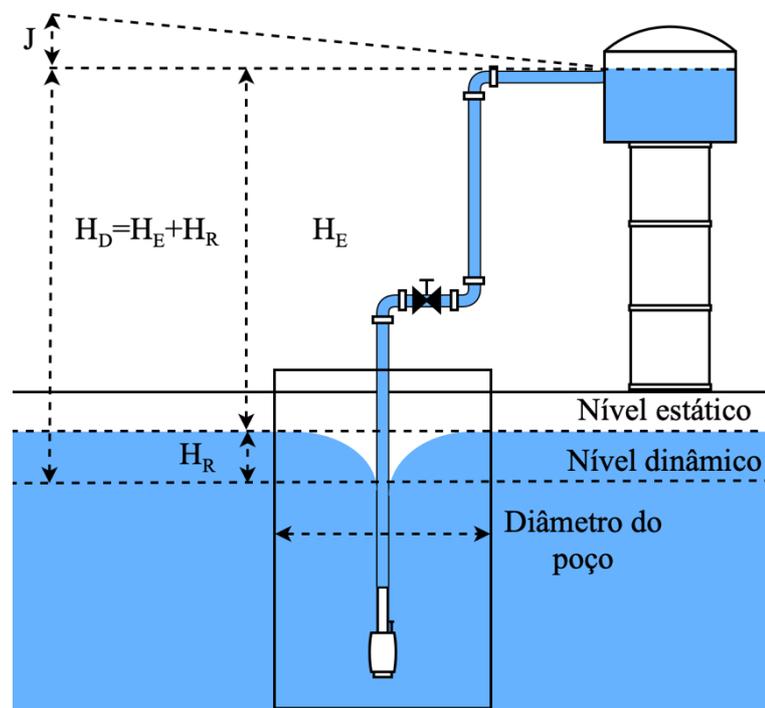
deslocamento do fluido é reduzido. Por conta disso, são projetadas para alturas manométricas fixas (Pinho e Galdino, 2014).

Para a pesquisa, utilizou-se duas bombas centrífugas, sendo uma para a bancada simuladora de H e outra para compor os sistemas fotovoltaicos de bombeamento.

1.5.1 Curvas características do sistema de bombeamento

A Figura 1.7 ilustra uma típica instalação de um sistema de bombeamento. A definição de altura manométrica (H) é o desnível entre um ponto de captação até a descarga para o reservatório e sua unidade é em metros de coluna d'água (mca). Ela é a pressão imposta na tubulação que a bomba deve ultrapassar para realizar o transporte do fluido. A altura estática (H_E) é o desnível no ponto da superfície líquida e, conforme a bomba realiza a sucção do fluido no poço, ocorre um rebaixamento (H_R), onde o nível da superfície do líquido é reduzido ao redor da tubulação, do estático para o dinâmico. Nesse estudo, a soma das duas alturas é representada por H_D , denominada de altura dinâmica (Santos, 2022; Macintyre, 1997; Karassik *et al.*, 2001).

Figura 1.7 – Representação de uma instalação hidráulica.



Fonte: Elaborado pelo autor, baseado em Santos (2022) e Macintyre (1997).

O aumento na vazão provoca o incremento do rebaixamento e, conforme a intensidade da sucção de água, pode resultar na elevação da pressão exercida sobre a bomba. Essa situação é mais evidente em poços de diâmetro reduzido, como os tubulares. Em contrapartida, em poços escavados, com diâmetro superior, essa condição tende a ocorrer com menor intensidade. Além

disso, a diminuição excessiva da superfície do fluido pode ocasionar problemas como a cavitação, onde o nível dinâmico do fluido alcança o ponto de instalação da bomba

Segundo Vasconcelos (2014), um tipo específico de poço escavado, com um diâmetro superior a 5 metros, é denominado de Amazonas. Ele é adequado para aquíferos com baixa transmissividade, parâmetro que determina a taxa natural de recomposição do nível estático do fluido. Assim, com o aumento da área do poço, a captação de água subterrânea se torna mais rápida, o que facilita a recuperação do nível de água no poço, reduzindo os níveis de rebaixamento, mesmo quando submetido a altas taxas de extração (Sá e Seemanapalli, 1999).

Ademais, é importante levar em consideração as perdas de carga na tubulação. Elas ocorrem devido ao atrito do fluido em contato com as paredes da tubulação, conexões, válvulas, reduções, curvas e entre outros, e são influenciadas pela pressão e vazão aplicadas pela bomba (Karassik *et al.*, 2001). Na Figura 1.7, o conjunto de perdas é representado por J . Todas as variáveis de pressão presentes no trabalho são dadas em mca. É preferível utilizar os valores das alturas manométricas nesta unidade pela maior usabilidade nas informações de placa das bombas e em projetos de instalação hidráulica, além dos dados em metros de coluna d'água serem mais intuitivos.

Embora as perdas de carga sejam comumente desprezadas em projetos pela baixa influência nos cálculos de projetos hidráulicos, há situações que não podem ser ignoradas. Como é retratado em Fortes *et al.* (2012), Santos *et al.* (2021) e Valiantzas (2005), para calcular as perdas, é necessário levar em conta as características da tubulação, como o diâmetro, comprimento, material e entre outros. O diâmetro do encanamento é um dos fatores mais importantes para reduzir tais perdas, pois são inversamente proporcionais, e em um SFB ele deve ter um valor maior possível comparado ao bombeamento convencional. Em uma situação a qual as características do encanamento sejam constantes (comprimento e diâmetro), a soma das perdas de carga J varia proporcionalmente ao quadrado da vazão do líquido, como é identificada na Equação (1.4).

$$J = k \times Q^2 \text{ [mca]} \quad (1.4)$$

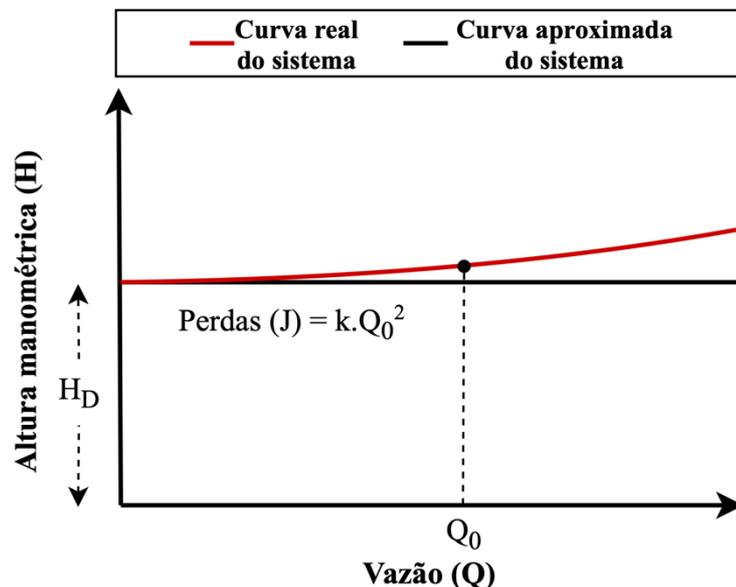
onde Q é a vazão do líquido; k é o coeficiente que substitui a relação entre os parâmetros da tubulação.

Por conseguinte, com os termos H_D e J , a soma total das perdas de carga no encanamento com o desnível geométrico a ser vencido, é identificado pelo termo H , na Equação (1.5). Normalmente, em alguns sistemas de bombeamento, as perdas de carga são presumidas como desprezíveis, em comparação ao valor elevado de H_D , mas isso deverá ser avaliado previamente pelo projetista.

$$H = H_D + J \text{ [mca]} \quad (1.5)$$

Em Macintyre (1997), a função de J pode ser ilustrada como uma curva parabólica, com início no eixo das ordenadas. Na Figura 1.8, a curva vermelha retrata as perdas de carga, e quanto maior a vazão da bomba, no ponto determinado de vazão Q_0 , mais distante ela estará da linha de H_D , e possui o nome de curva do sistema ou curva do encanamento, e é importante no momento da escolha de uma motobomba. Para o trabalho em questão, considerou-se uma instalação com perdas desprezíveis, pois os ensaios realizados nos sistemas fotovoltaicos de bombeamento foram desempenhados em uma bancada de simulação de pressão. Assim, a curva é aproximada a uma linha reta da altura estática com o rebaixamento.

Figura 1.8 – Curva do sistema ou do encanamento.

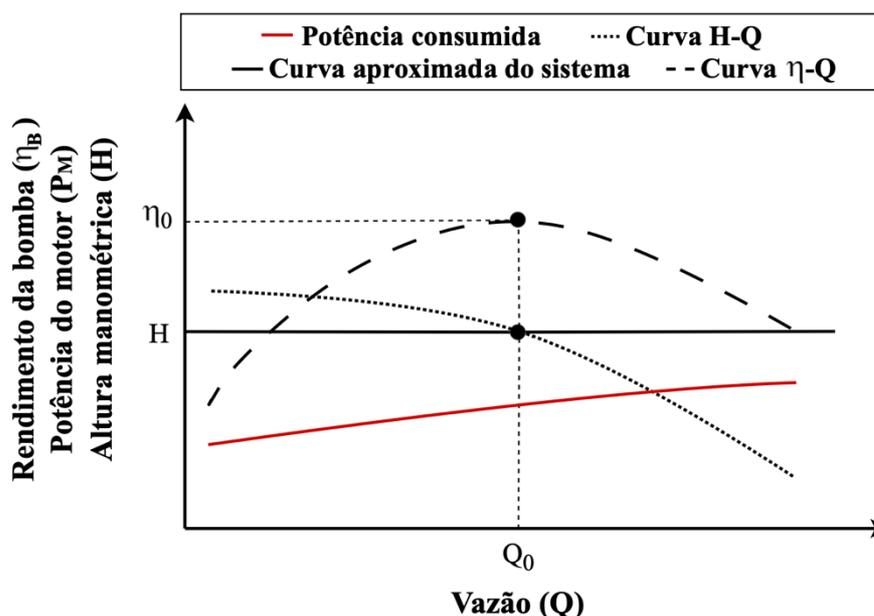


Fonte: Elaborado pelo autor, baseado em Santos (2022) e Macintyre (1997).

1.5.2 Grandezas e curvas características de bombas centrífugas

Na Figura 1.9 são mostradas curvas características da bomba, que relaciona a vazão com a altura manométrica (curva $H-Q$), o rendimento (curva $\eta-Q$), e com a potência requerida pelo motor. Elas são os diagramas que determinam o comportamento da bomba, cujo funcionamento depende da relação dessas grandezas (Brasil, 2010). Conforme mencionado, a medida do aumento da pressão, o poder da turbobomba de deslocar o fluido é diminuído e vice-versa. O ponto comum da interseção curva $H-Q$ com a curva do sistema é o ponto de trabalho da bomba na instalação hidráulica, e ela deve estar, na medida do possível, o mais próximo para atingir ponto de máximo rendimento, denominado neste trabalho de ponto máximo de eficiência (PME), do inglês *best efficiency point* (BEP), baseado em Karassik *et al.* (2001) e Santos (2022).

Figura 1.9 – Curvas características da bomba.



Fonte: Elaborado pelo autor do trabalho, baseado em *Bureau of Efficiency Energy* – BEE, 2015.

Com o tempo de uso da motobomba, é esperado a redução do seu rendimento nos pontos de trabalho nominais da fabricante, por conta do uso contínuo da bomba, falta de manutenção, entre outros. Com isso, aos poucos o PME é modificado para um ponto de operação diferente do nominal, até chegar em casos a qual a bomba não supre mais as necessidades do sistema, levando a sua substituição.

Outra característica das curvas típicas de uma bomba centrífuga é a potência requerida pelo seu motor (P_M), que varia conforme a vazão do fluido é alterado. Sob pressão constante, quanto maior a vazão mais potência será necessária no consumo da turbobomba, como é retratado na Figura 1.9.

As fabricantes podem fornecer tabelas e gráficos com as relações de H-Q e η -Q para demonstrar a performance e a eficiência da motobomba, porém há situações em que é provido somente a curva H-Q. Contudo, para esta pesquisa, é imprescindível obter o mínimo conhecimento de ambas, pois por intermédio dessas, extraem-se as funções $H(Q)$ e $\eta(Q)$, importantes para o objetivo de otimização do uso de bombas com a energia fotovoltaica.

A eficiência nominal de uma bomba descrita pela sua fabricante é determinada por valores fixos de pressão e vazão a ela submetidas. No entanto, em um projeto de instalação, é comum que a bomba trabalhe em outros pontos de sua curva de altura manométrica e vazão para atender a curva do sistema, e como resultado, assume-se distintos valores de eficiência.

Portanto, é crucial compreender as condições específicas nas quais a motobomba deve operar antes de sua aquisição. Se a bomba tem seu ponto de máxima eficiência a 35 mca, pode

não ser apropriada para instalação em um poço com profundidade de 15 metros e uma descarga para um reservatório a 5 metros de altura em relação ao solo, resultando em um sistema com 20 mca. Nesse caso, é mais vantajoso buscar motobombas cujo PME esteja próximo a essa altura manométrica.

Diante disso, deve ser feita uma análise do ponto de trabalho da bomba a ser instalada, e se as novas condições H e Q do sistema ainda resultam em uma eficiência próxima da máxima fornecida no catálogo da fabricante. Para isso, há um cálculo chamado de semelhança hidrodinâmica, com base no conceito da lei de similaridades, que descreve matematicamente uma relação direta entre as grandezas características de uma bomba centrífuga: potência de entrada da bomba (P_B); vazão; e a altura manométrica, em função da velocidade de rotação da bomba (N), em pontos que a bomba opere com o mesmo rendimento (Fortes *et al.*, 2012; Roma, 2001; Çengel e Cimbala, 2015).

Na explicação de Karassik *et al.* (2001), a lei das similaridades é usada tanto para as bombas hidrostáticas como para as hidrodinâmicas (turbobombas), porém, os parâmetros de comparação entre ambas as bombas são diferentes e não podem ser tratadas de forma análoga. Para a centrífuga, as leis são expressas pelas Equações (1.6), (1.7) e (1.8).

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (1.6)$$

$$\frac{H_1}{H_2} = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 \quad (1.7)$$

$$\frac{P_{B1}}{P_{B2}} = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^3 \quad (1.8)$$

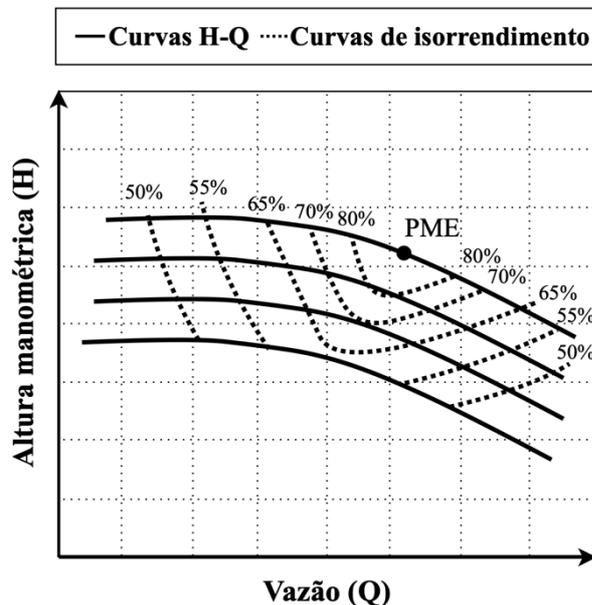
Conhecido os atributos da bomba para uma rotação da bomba em N_1 , é possível elaborá-los também para uma nova N_2 . A vazão cresce linearmente com a velocidade de rotação da bomba, enquanto a altura e a potência têm uma dependência com o quadrado e o cubo da rotação, respectivamente. Ao fixar a rotação da bomba, é possível combinar as Equações (1.6) e (1.7), resultando na equação do lugar geométrico dos pontos semelhantes, ver Equação (1.9).

$$H_1 = \left(\frac{Q_1}{Q_2}\right)^2 \times H_2 \quad (1.9)$$

O conjunto desses pontos traçam curvas que representam valores constantes de eficiência, com formatos de parábolas e são chamadas de curvas de isorrendimento ou isoeffiência (Santos, 2022). O PME fica localizado ao centro dessas curvas, e à medida que a parábola esteja afastada do PME, menor será a eficiência da bomba, como mostra uma

exemplificação típica dessas curvaturas na Figura 1.10. Cada curva H-Q representa diferentes velocidades de rotação.

Figura 1.10 – Exemplo de curvas de isorrendimento.



Fonte: Elaborado pelo autor.

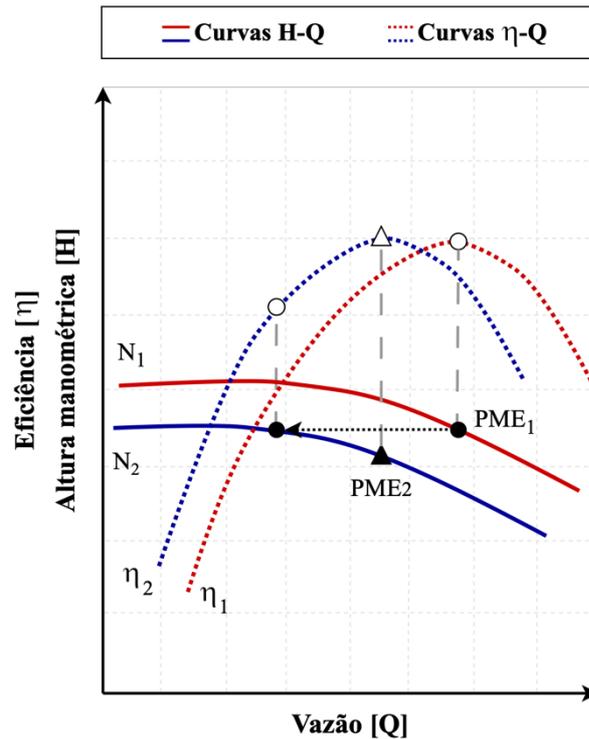
1.6 A aplicação das turbobombas em sistemas fotovoltaicos

Compreende-se que, visando otimizar o desempenho de uma bomba, o planejamento da instalação hidráulica deve sempre considerar a curva do sistema. A sua influência determinará a seleção do ponto de operação, alinhando-o à curva H-Q da bomba, de forma a estar próximo do PME para alcançar o rendimento máximo do sistema.

Em um sistema convencional, a bomba centrífuga é alimentada pela rede da concessionária local, sistema com baterias ou geradores a diesel, que garantem a operação contínua do sistema em frequência de rotação nominal da bomba de 60 Hertz (Hz), valor adotado no Brasil, ou de 50 Hz em outros países, como os Estados Unidos. O ponto de melhor eficiência indicado pela fabricante considera uma atuação constante da motobomba em sua frequência nominal.

No entanto, em sistemas de bombeamento supridos por geradores FV a situação é diferente, pois a frequência de rotação varia conforme a disponibilidade da irradiância incidente e acarreta operações em frequências abaixo da nominal. Assim, em uma situação desejável para a motobomba trabalhar com eficiência otimizada, é provável que o PME apontado pela fabricante esteja inadequado, ao considerar os momentos de frequências abaixo de 60 Hz que a motobomba irá atuar (Santos, 2022), afetando diretamente na eficiência final do sistema (ver Figura 1.11).

Figura 1.11 – Modificação das curvas H-Q e η -Q e PME com a velocidade de rotação.



Fonte: Elaborado pelo autor, baseado em Macintyre (1997).

Considera-se que N_1 seja a rotação nominal da motobomba, com uma curva de eficiência η_1 -Q, onde seu máximo está em PME_1 . Com isso, a melhor altura manométrica a ser utilizada está indicada no PME_1 . A utilização do sistema fotovoltaico tende a reduzir a velocidade de rotação e vazão da bomba, principalmente em momentos de baixa irradiância incidente, resultando, por exemplo, na curva H-Q de N_2 . Para essa velocidade de rotação momentânea, há uma nova curva de eficiência, η_2 -Q, e o ponto otimizado para esse cenário está localizado em PME_2 . Com a nova frequência de rotação, haverá o decaimento da vazão do sistema. Em consequência da instalação da bomba na altura manométrica indicada no PME_1 , o ponto de eficiência que estava máximo em η_1 -Q passará a ser menor na nova curva η_2 -Q. Para incrementar a eficiência da bomba em N_2 , a altura manométrica deve ser reduzida de forma que o ponto de trabalho esteja o mais próximo possível do PME_2 . Contudo, como a irradiância varia constantemente, há sempre diferentes frequências de rotação da bomba e, com isso, pontos de máxima eficiência.

Santos (2022) propôs um método para encontrar o ponto máximo de eficiência solar, o PMES, a partir do perfil de produção do GFV, de acordo com a variação da irradiância e da temperatura, para obter equações analíticas que visam prever a faixa operacional da bomba centrífuga e determinar o ponto de operação otimizado médio para o dia, assim como a eficiência e o provável acúmulo de água ao final do dia.

Com o PMES, o projetista pode determinar qual seria o poço com a curva do sistema ideal para o modelo específico da motobomba ao utilizar a energia fotovoltaica. Isso permite avaliar se o poço em questão é de fato a melhor opção para a instalação desse equipamento. Para este trabalho, aplicou-se tal método para comparar o uso do PME e do PMES em um determinado modelo de bomba centrífuga, e comparar com diferentes dispositivos de condicionamento de potência, e verificar a diferença de desempenho do SFB.

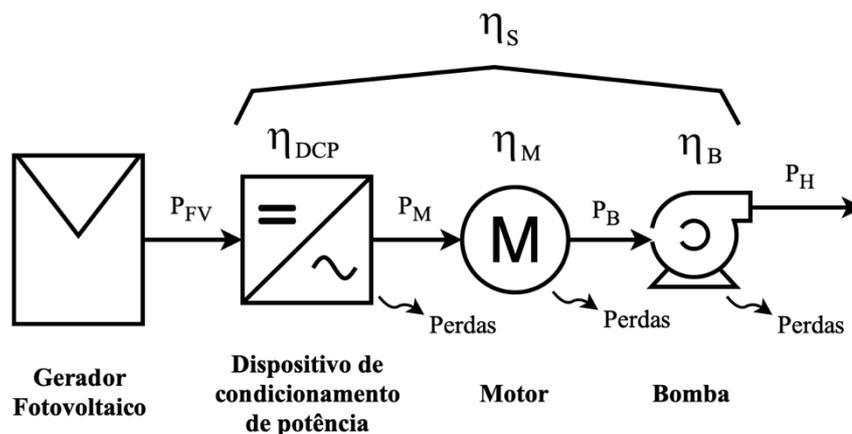
1.7 Fatores que influenciam na determinação do ponto máximo de eficiência solar (PMES)

A estratégia para a estimação do PMES desenvolvida por Muñoz *et al.* (2015) e Santos (2022) depende das características de cada componente do SFB: as potências do GFV e da motobomba, suas curvas de desempenho, mas, principalmente, também depende do conhecimento da eficiência e conversão de energia de cada etapa do sistema. A Figura 1.12 retrata uma configuração típica de um SFB, utilizado nos exemplos desta pesquisa. A ilustração mostra que a cada etapa de conversão de energia dos dispositivos do SFB, são geradas perdas, e isso afeta nas curvas de eficiência do sistema fotovoltaico de bombeamento, e determiná-las não é um processo simples. Cada equipamento gera perdas específicas, intrínsecas às suas características, como detalha a Equação (1.10).

$$\eta = \frac{P_{SAÍDA}}{P_{ENTRADA}} = \frac{P_{SAÍDA}}{P_{SAÍDA} + \text{Perdas}} \quad (1.10)$$

onde η é a representação da eficiência; $P_{SAÍDA}$ e $P_{ENTRADA}$ são, respectivamente, a potência de saída e entrada de qualquer sistema.

Figura 1.12 – Configuração típica de um SFB.



Fonte: Elaborado pelo autor, adaptado de Santos (2022).

Quando há informações detalhadas sobre cada componente do sistema, a confiabilidade da simulação é aprimorada, proporcionando uma aproximação mais fiel à realidade. Todavia,

usualmente a maioria das fabricantes não fornecem as curvas de eficiência de seus produtos, apenas um valor fixo, que compreende o máximo que o equipamento pode alcançar, ou quando opera a 100 % de sua carga nominal e, a depender do componente do SFB, pode não ser o suficiente para calcular o PMES, exigindo, ao menos, uma aproximação da sua curva.

Nesse contexto, antes de iniciar a estimativa do ponto de máxima eficiência solar nos cálculos analíticos da simulação, são empregadas diferentes metodologias, específicas para cada componente do sistema, a fim de determinar os respectivos rendimentos a serem utilizados.

1.8 Estimação das eficiências dos componentes do SFB

1.8.1 Eficiência do DCP (η_{DCP})

Para η_{DCP} , o cálculo é feito por meio do quociente entre a potência de entrada do gerador fotovoltaico e a saída, como demonstra a Equação (1.11).

$$\eta_{DCP} = \frac{P_M}{P_{FV}} \quad (1.11)$$

onde P_{FV} é a potência advinda do GFV e que alimenta o DCP; e P_M é a sua potência de saída, que segue para o motor, ou seja, é a potência disponibilizada para o motor.

O valor de η_{DCP} depende da porcentagem de carregamento do inversor, obtida da relação da potência de saída com a entrada. Em Schimdt, Jantsch e Schimdt (1992) citado por Zilles *et al.* (2012), a estimação da curva de eficiência de inversores usados em sistemas fotovoltaicos conectados à rede é feita por meio da Equação (1.12). Esse mesmo modelo pode ser empregado nos DCP atuados em sistemas de bombeamento.

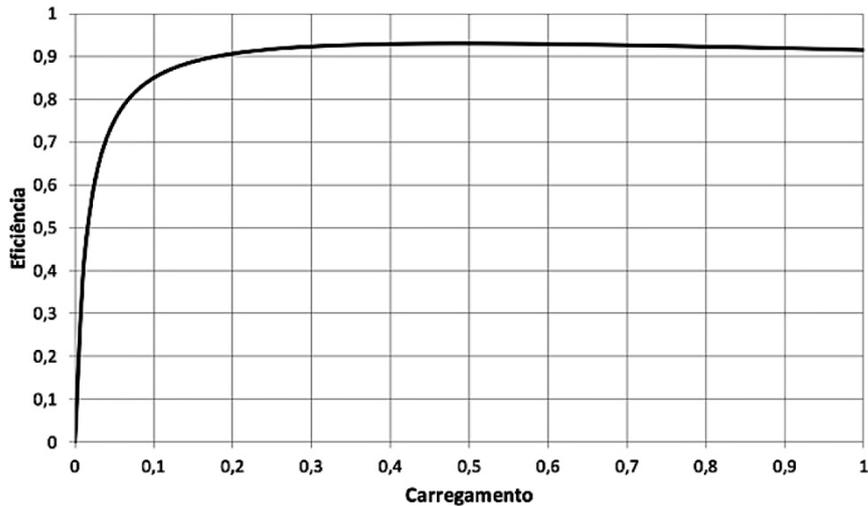
$$\eta_{DCP} = \frac{p_i}{p_i + k_{i0} + k_{i1} * p_i + k_{i2} * p_i^2} \quad (1.12)$$

onde os coeficientes k_{i0} , k_{i1} e k_{i2} são relacionados às perdas do inversor, em que k_{i0} representa as perdas sem o carregamento, e não depende da potência de saída, o k_{i1} e k_{i2} são, respectivamente, as perdas lineares e as de *Joule*, que varia com o quadrado da potência normalizada de saída, p_i , obtida com a relação da potência de saída com a potência nominal do inversor $p_i = P_{SAÍDA}/P_{INV}$. O cálculo dos coeficientes pode ser realizado por meio dos valores da eficiência do DCP para 10 %, 50 % e 100 % da potência nominal do inversor.

A Figura 1.13 exemplifica uma típica curva de um inversor. Nota-se que, antes de 20 % do carregamento, há uma queda mais acentuada na eficiência do inversor, porém, após isso, a eficiência se mantém relativamente estável. Em geral, sistemas de bombeamento necessitam de uma potência mínima para iniciar a descarga de água e depende da pressão exercida sobre ela,

logo, como foi apontado por Santos (2022), abaixo de 20 % de carregamento do inversor é improvável que a bomba inicie sua operação, por conta da potência insuficiente. Por meio dessa análise, é possível considerar η_{DCP} como uma constante.

Figura 1.13 – Curva de eficiência de um inversor aproximada.

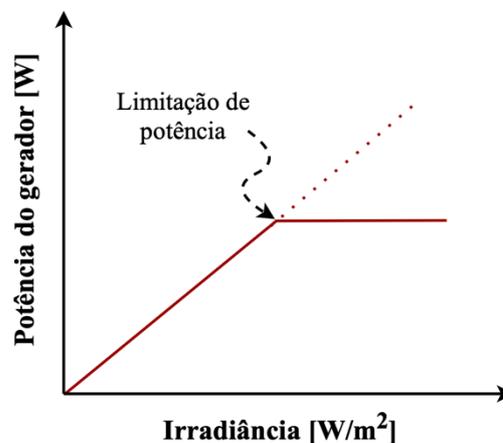


Fonte: Araújo, Rank e Bueno (2016).

1.8.1.1 Limitação de potência do gerador fotovoltaico

Em sistemas fotovoltaicos, nem sempre P_{FV} é a potência teórica a ser entregue para o DCP (P_{MP}), pois há possibilidades de ocorrer um fenômeno de limitação que o DCP exerce sobre o GFV (ver Figura 1.14). Como apontado por Macêdo (2006), isso pode ser estabelecido por diferentes meios, entre eles o controle da temperatura do DCP, sobredimensionamento do gerador, ou por ter um limite estabelecido na programação do dispositivo de condicionamento de potência e, no caso do SFB, ser um limite imposto pela própria motobomba, por intermédio de sua vazão.

Figura 1.14 – Limitação de potência



Fonte: Elaborado pelo autor.

Assim, dado um dia de operação do SFB, até um certo nível de irradiância, o DCP pode entregar uma potência esperada para a motobomba, baseado nas especificações do gerador. Todavia, ao iniciar a limitação do GFV, o ponto de operação da curva I-V é deslocado para permanecer P_{FV} relativamente constante, e isso afeta o ponto de trabalho da motobomba.

1.8.2 Eficiência do motor (η_M)

O cálculo de η_M é dado pela relação entre a potência que supre a bomba com a do motor, ver Equação (1.13).

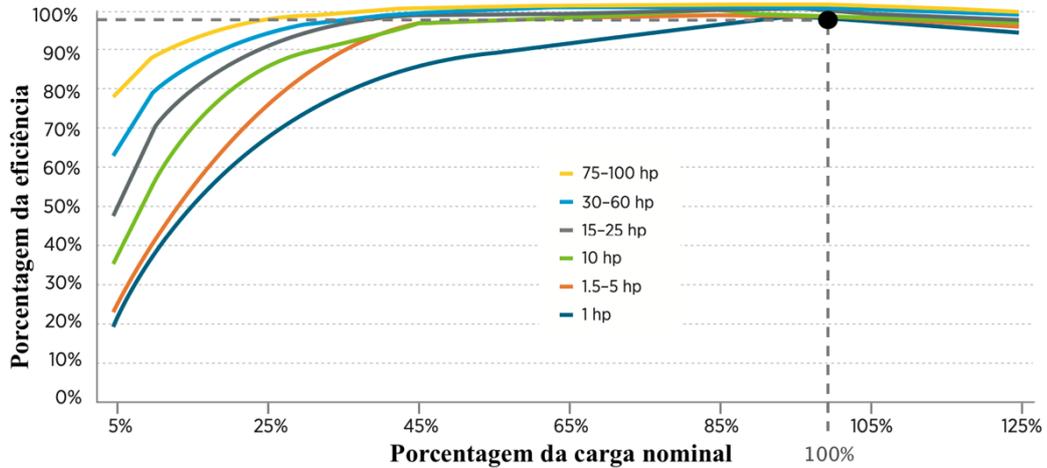
$$\eta_M = \frac{P_B}{P_M} \quad (1.13)$$

Não são todas as fabricantes que fornecem o valor da eficiência máxima de um motor, muito menos sua curva, e ela depende das características da sua carcaça, potência e torque. Além disso, quando disponibilizado o valor nominal de η_M , este não é indicado para o cálculo por ser apenas um valor fixo, relacionado a eficiência em 100 % da carga nominal do motor, o que não é muito preciso, pois assume que a máquina possuirá essa eficiência para todo nível de carga (Hsu *et al.*, 1996).

Para o DCP, este método é mais viável devido a sua curvatura da eficiência ser menos arqueada, como foi anteriormente explicado, porém, para o motor, este funciona em diferentes velocidades de rotação, e a curva de η_M geralmente só possui maior estabilidade a partir de 50 % do funcionamento da carga nominal.

Segundo o Recursos Naturais do Canadá (*Natural Resources of Canada* – NCR, 2004a) e McCoy e Douglass (2014) do Departamento de Energia dos Estados Unidos (*United States Department of Energy*), nos exemplos das curvas típicas de η_M em diferentes níveis de potência (ver Figura 1.15), percebe-se que a medida do aumento da potência nominal do motor, a curva de η_M se torna mais abrupta e acentuada. Já para motores com potências iguais ou abaixo de 1 cv, o arqueamento da curvatura de eficiência é mais suave. Com a intermitência da velocidade de rotação e do nível de carga nominal da motobomba em um SFB, é previsto uma operação da motobomba muitas vezes abaixo da metade de sua capacidade. É melhor para o motor de indução trabalhar em uma faixa de 65-95 % da sua capacidade nominal, para extrair a eficiência máxima, pois o fator de potência (FP) costuma diminuir drasticamente abaixo de 65 % da carga, principalmente em motores com menor cavalo-vapor (NCR, 2004b; McCoy e Douglass, 2014).

Figura 1.15 – Curvas típicas da eficiência de motores.



Fonte: Adaptado de McCoy e Douglass (2014).

Há vários mecanismos para estimar a curva de η_M que levam em conta as perdas causadas pela fricção mecânica, carga, estator, rotor e núcleo. Nos trabalhos de Lu, Habetler e Harley (2008), Lu (2006) e Li *et al.* (2014) exemplificam metodologias que utilizam a corrente, o escorregamento, circuitos equivalentes e outros para, matematicamente, determinar a função da eficiência do motor. As pesquisas de Santos (2022) e Muñoz *et al.* (2015) utilizaram um método que consiste em interpolar as típicas curvas de η_M , fornecidas na literatura (NCR, 2004b; Burt *et al.*, 2008; McCoy e Douglass, 2014; Rivalin *et al.*, 2018).

Mesmo com diferenças no formato do arco, as curvas de η_M são semelhantes as de η_{DCP} . Fundado nisso, Muñoz *et al.* (2015) se baseia na Equação (1.12), usada para estimar a curva do inversor e de outros DCP, para realizar a interpolação da curva da eficiência do motor. Mediante as curvaturas típicas da Figura 1.15 o método foi aplicado, resultando a Equação (1.14).

$$\eta_M = \frac{P_B}{P_B + \text{Perdas}} = \frac{p}{p + k_0 + k_1 * p + k_2 * p^2} \quad (1.14)$$

em que:

$$p = \frac{P_B}{P_{NOM}} \quad (1.15)$$

onde p é a potência de saída do motor, P_B , normalizada com relação à potência nominal da motobomba (P_{NOM}); os coeficientes k_0 , k_1 e k_2 são fatores relacionados às perdas do motor.

Entretanto, ressalta-se que a curva de 1 HP (1,014 cv) da Figura 1.15 possui um rendimento de motor próximo a 97 % em 100 % da carga nominal. No entanto, para motores com η_M nominal diferente, realiza-se uma calibração na curva, uma relação entre η_M e o valor de 97 %, para adquirir os novos coeficientes.

1.8.3 Eficiência da bomba (η_B) e da motobomba (η_{MB})

A eficiência da bomba é definida pela razão da potência hidráulica (P_H) com P_B , ver Equação (1.16). É por meio desta que se compõe a curva η - Q , enquanto η_{MB} é a eficiência determinada pela relação entre P_H e a potência demandada pelo motor da bomba (P_M), com o cálculo apresentado na Equação (1.17).

$$\eta_B = \frac{P_H}{P_B} = \frac{\rho \cdot g \cdot H \cdot Q}{P_B} \quad (1.16)$$

$$\eta_{MB} = \frac{P_H}{P_M} \quad (1.17)$$

onde ρ é a densidade da água e g é a aceleração da gravidade.

1.8.3.1 Estimativa da curva η - Q

É de extrema importância a utilização de η - Q para o método aplicado pois quaisquer modificações na sua curvatura, afeta diretamente o resultado proposto nesta pesquisa. No entanto, assim como foi dito para a curva de eficiência do motor, tanto a eficiência nominal da bomba quanto a sua curva η - Q podem estar indisponíveis no catálogo da motobomba, como foi no caso deste trabalho. Logo, para obter essas informações, necessitou-se do uso de valores típicos em equipamentos semelhantes e do conhecimento das eficiências do sistema e do motor.

Com base nas Equações (1.13) e (1.16), obtém-se a Equação (1.18). Ao trabalhar continuamente na frequência nominal (f_N) da bomba, cada nível de altura manométrica H acarreta uma vazão máxima para essa frequência de operação (Q_f). Como mencionado anteriormente, a potência exigida pelo motor P_M é afetada pela variação da vazão, o que resulta em alterações pontuais na porcentagem de carga aplicada e de η_M .

$$\eta_B = \frac{\rho \cdot g \cdot H \cdot Q_f}{P_M \cdot \eta_M} \quad (1.18)$$

Assim, o objetivo é determinar a eficiência da bomba com operação na frequência nominal, a qual, por intermédio de uma altura manométrica específica, obtém-se Q_f , a potência e a eficiência do motor. Essa análise ao ser realizada para diferentes valores de alturas manométricas, permite uma estimativa da curva η - Q .

Segundo NCR (2004a) e McCoy e Douglass (2014), por meio curva da Figura 1.15 e com o conhecimento da porcentagem de carga aplicada no momento, o fator de carga (*Load Factor* – LF), a eficiência do motor é identificada. O LF é definido pela Equação (1.19) pelo quociente da potência medida na entrada do motor pela potência requerida para o motor se este estivesse operando na sua capacidade nominal (P_{MRN}).

$$LF = \frac{P_M}{P_{MRN}} \quad (1.19)$$

P_M pode ser extraída por intermédio da medição dos parâmetros de tensão, corrente e fator de potência, com o uso de equipamentos analisadores de energia. No caso de um sistema trifásico, é calculado pela Equação (1.20).

$$P_M = I \cdot V \cdot FP \cdot \sqrt{3} \text{ [W]} \quad (1.20)$$

onde FP é o fator de potência, I é a corrente de linha e V a tensão de linha.

Para P_{MRN} , aplica-se a Equação (1.20) com os valores fornecidos no catálogo da fabricante. Outra abordagem, conforme descrito por McCoy e Douglass (2014), é utilizar a potência nominal em cavalos-vapor (cv) e dividir pela eficiência do motor em sua capacidade nominal, ver Equação (1.21).

$$P_{MRN} = \frac{P_{NOM}[cv] \cdot 735,5}{\eta_M} \text{ [W]} \quad (1.21)$$

1.8.4 Eficiência do sistema (η_S)

A eficiência do sistema é o resultado do bombeamento de água dada a potência recebida pelo sistema. No caso do SFB, é determinada pela relação entre P_H e a potência entregue pelo gerador fotovoltaico, com o cálculo apresentado na Equação (1.22). O quociente dos somatórios de P_H e de P_{FV} durante um dia de trabalho é a eficiência geral do SFB, dadas as condições impostas e considerando que os intervalos de integração são idênticos e constantes.

$$\eta_S = \frac{P_H}{P_{FV}} \quad (1.22)$$

1.8.5 Eficiência de SPMP (η_{SPMP})

É o resultado da capacidade do DCP de otimizar a saída de potência do GFV (P_{FV}) ao que deveria ser entregue teoricamente, o P_{MP} , obtida por meio da Equação (1.2). Essa eficiência é adquirida pela relação entre P_{FV} e P_{MP} , como mostra a Equação (1.23).

$$\eta_{SPMP} = \frac{P_{FV}}{P_{MP}} \quad (1.23)$$

1.9 Simulação do MATLAB para a aquisição do PMES

Abordou-se os conceitos do ponto de máxima eficiência (PME) e o ponto de máxima eficiência solar (PMES) e as suas diferenças. Sabe-se que um SFB apresenta diferentes PMES por causa da intermitência solar durante o dia, a qual a motobomba atua com níveis de frequência de rotação variáveis, diferente de um sistema de bombeamento convencional ligado à rede da concessionária, que opera na frequência nominal (f_N).

O método de Santos (2022) e Muñoz *et al.* (2015) considera as informações obtidas nas características elétricas do gerador, nas curvas H-Q e η -Q da bomba e nas eficiências dos componentes do SFB para simular a operação do SFB, apresentando, como resultado, os conjuntos de vazões e frequências de rotação para diferentes alturas manométricas. De forma a reproduzir os cálculos apresentados para a aquisição do PMES nesses trabalhos, utilizou-se o programa computacional MATLAB, onde o código é dividido em etapas.

1.9.1 Inserção das características do sistema e da motobomba

O programa é iniciado com a inserção dos dados relacionados a motobomba, como sua potência nominal e as alturas manométricas a serem simuladas no código, gerando o conjunto $\mathbf{H} = \{H_1, \dots, H_j, \dots, H_m\}$ com m elementos. Para este trabalho, quaisquer conjuntos são representados por símbolos em negrito.

Somado a isso, são introduzidas as curvas H-Q e η -Q da bomba. A partir delas, extraem-se as funções de $H(Q)$ e $\eta(Q)$, mediante interpolação. O grau das funções depende da metodologia utilizada pelo autor. Moreno *et al.* (2009) propôs funções de segundo grau para representar ambas as curvaturas, já para Ulanicki, Kahler e Coulbeck (2008) e Santos (2022), apenas a primeira é aproximada em uma função de segundo grau, enquanto a curva η -Q é expressa em terceiro grau. Para este trabalho, as funções adotadas de $H(Q)$ e $\eta(Q)$ serão de segundo e terceiro grau respectivamente, ver Equações (1.24) e (1.25).

$$H(Q) = a_1 \times Q^2 + b_1 \times Q + c_1 \quad (1.24)$$

$$\eta(Q) = a_2 \times Q^3 + b_2 \times Q^2 + c_2 \times Q + d_2 \quad (1.25)$$

onde a_1 , b_1 , c_1 , a_2 , b_2 , c_2 e d_2 são os coeficientes resultantes.

1.9.2 Inserção das características do gerador fotovoltaico e do dispositivo de condicionamento de potência

O desempenho do SFB é diretamente proporcional a quantidade de energia recebida pelo GFV e transmitida pelo DCP, logo, as informações relacionadas a sua potência nominal de referência ($P_{MP, REF}$), suas perdas por temperatura (γ_{MP}) e a eficiência do DCP devem ser apresentadas no programa para obter uma simulação mais equivalente à realidade.

Inicialmente, adquirem-se as informações das características da região, a irradiância (G) e a temperatura ambiente para o cálculo da temperatura de operação da célula (T_C), quando esta não for obtida diretamente por meio de medição. No caso dos ensaios experimentais apresentados neste trabalho, os dados são fornecidos respectivamente por células fotovoltaicas de referência e sensor de temperatura medindo diretamente na parte posterior da carcaça dos

módulos fotovoltaicos, sendo aproximada a temperatura da célula. Os seus valores são coletados a um certo intervalo de tempo, gerando dois conjuntos de variáveis com n elementos: $\mathbf{G} = \{G_1, \dots, G_i, \dots, G_n\}$ e $\mathbf{T}_C = \{T_{C1}, \dots, T_{Ci}, \dots, T_{Cn}\}$.

Da posse desses dados, de $P_{MP, REF}$ e de γ_{MP} , utilizou-se a Equação (1.2) com o objetivo de adquirir o conjunto da potência elétrica do GFV, $\mathbf{P}_{MP} = \{P_{MP1}, \dots, P_{MPi}, \dots, P_{MPn}\}$, como mostra a Equação (1.26).

$$\mathbf{P}_{MP} = P_{MP, REF} \times \frac{\mathbf{G}}{G_{REF}} \times [1 + \gamma_{MP} \times (\mathbf{T}_C - T_{C, REF})] \quad [W] \quad (1.26)$$

Inicialmente, o código MATLAB considera que o SFB atue de forma que a potência do gerador obtida com o SPMP do DCP seja igual a potência teórica ($\mathbf{P}_{FV} = \mathbf{P}_{MP}$). Todavia, em situações de sobredimensionamento do gerador, onde P_{FV} supera a potência demandada pela motobomba, esta pode delimitar a potência do GFV, por meio do DCP. Para este cenário, optou-se por incluir no código essa restrição, teoricamente, na programação desta metodologia.

Com esse propósito, considera-se que a bomba consiga obter uma operação em frequência nominal com a potência do gerador fotovoltaico. Dessa forma, é possível alcançar Q_f para uma dada altura manométrica, resultando em uma potência requerida pelo motor. Como resultado, a bomba impõe uma restrição à potência a ser fornecida pelo DCP, que realiza um deslocamento do ponto de operação da curva I-V, de forma a entregar uma potência próxima ao requerido. Assim, P_{FV} será equivalente a P_{MP} até que a bomba alcance a P_M relacionada a Q_f , sem desconsiderar a eficiência do DCP, ver Equação (1.11). Após isso, a potência do GFV é limitada, conforme as Equações (1.27) e (1.28).

$$\text{Se } P_{FV} < \frac{P_M}{\eta_{DCP}} \text{ então } P_{FV} = P_{MP} \quad (1.27)$$

$$\text{Se } P_{FV} > \frac{P_M}{\eta_{DCP}} \text{ então } P_{FV} = \frac{P_M}{\eta_{DCP}} \therefore P_M = \frac{\rho \cdot g \cdot H \cdot Q_f}{\eta_B \cdot \eta_M} \quad (1.28)$$

1.9.3 Aquisição da potência da bomba

Com a obtenção de \mathbf{P}_{FV} , inicia-se o processo para a simulação do funcionamento do sistema fotovoltaico de bombeamento. Primeiramente, calcula-se a potência da bomba com base nas características do GFV, do DCP e do motor. Isto é feito por intermédio no modelo típico de SFB da Figura 1.12, onde é presumido a Equação (1.29).

$$\mathbf{P}_B = \eta_{DCP} \cdot \eta_M \cdot \mathbf{P}_{FV} \quad (1.29)$$

onde $\mathbf{P}_B = \{P_{B1}, \dots, P_{Bi}, \dots, P_{Bn}\}$ é o conjunto de n elementos da potência da bomba. Das Equações (1.14), (1.15) e (1.29), obtém-se:

$$k_2 \cdot \mathbf{p}^2 + (k_1 + 1) \cdot \mathbf{p} + k_0 - \frac{\eta_{DCP} \cdot \mathbf{P}_{FV}}{P_{NOM}} = 0 \quad (1.30)$$

Cada elemento de \mathbf{P}_{FV} determina um componente da potência normalizada do motor do conjunto $\mathbf{p} = \{p_1, \dots, p_i, \dots, p_n\}$. P_{NOM} é obtido nas informações do manual da motobomba. Os coeficientes k_0 , k_1 e k_2 , e o valor de η_{DCP} variam com a motobomba e o dispositivo de condicionamento de potência utilizado no SFB, respectivamente. Com \mathbf{p} e P_{NOM} , calcula-se \mathbf{P}_B , pela Equação (1.15).

1.9.4 Aquisição das características da motobomba

Ao considerar a lei de similaridades, em que é possível presumir as velocidades de rotação N_1 e N_2 como, respectivamente, a frequência de rotação nominal (f_N) e a frequência de operação atual da bomba (f), como foi apontado em Santos (2022), reescreveu-se as equações como:

$$Q_f = \frac{f_N}{f} \times Q \quad (1.31)$$

$$H_f = \left(\frac{f_N}{f}\right)^2 \times H \quad (1.32)$$

onde Q_f e H_f são os valores para a frequência nominal de 60 Hz.

A partir disso, $H(Q)$ e $\eta(Q)$ se tornaram funções de duas variáveis: Q e f , pois ambas são inconstantes e dependem uma da outra, o que resulta nas funções $H(Q, f)$ e $\eta(Q, f)$. A partir disso, incorporaram-se a elas as fórmulas da altura manométrica, Equação (1.5), e a da potência da bomba, Equação (1.29), nessa ordem, para as duas funções. Ao levar em conta também que o resultado da simulação gera os conjuntos vazão $\mathbf{Q} = \{Q_1, \dots, Q_i, \dots, Q_n\}$ e frequência de operação $\mathbf{f} = \{f_1, \dots, f_i, \dots, f_n\}$, forma-se o sistema não-linear composto pelas Equações (1.33) e (1.34).

$$(a_1 - k) \cdot \mathbf{Q}^2 + b_1 \cdot \frac{\mathbf{f}}{f_N} \cdot \mathbf{Q} + c_1 \cdot \left(\frac{\mathbf{f}}{f_N}\right)^2 - \mathbf{H} = 0 \quad (1.33)$$

$$\left[\mathbf{P}_B \cdot a_2 \cdot \left(\frac{f_N}{\mathbf{f}}\right)^3 - \rho g k \right] \cdot \mathbf{Q}^3 + \mathbf{P}_B \cdot b_2 \cdot \left(\frac{f_N}{\mathbf{f}}\right)^2 \cdot \mathbf{Q}^2 + \left[\mathbf{P}_B \cdot c_2 \cdot \frac{f_N}{\mathbf{f}} - \rho g \mathbf{H} \right] \cdot \mathbf{Q} + \mathbf{P}_B \cdot d_2 = 0 \quad (1.34)$$

onde f_N é 60 Hz; a densidade do fluido ρ para água aproxima-se a 997 kg/m^3 ; a aceleração da gravidade g é de $9,8 \text{ m/s}^2$. O coeficiente das características da tubulação, k , relacionado a fórmula da altura manométrica, será considerado nulo para esse trabalho, pois os dados de pressão adquiridas pela bancada de ensaios já incluem as perdas causadas pela tubulação, o que torna dificultoso a determinação específica de k . Com isso, o sistema composto é simplificado com as Equações (1.35) (1.36).

$$a_1 \cdot Q^2 + b_1 \cdot \frac{f}{f_N} \cdot Q + c_1 \cdot \left(\frac{f}{f_N}\right)^2 - H = 0 \quad (1.35)$$

$$P_B \cdot a_2 \cdot \left(\frac{f_N}{f}\right)^3 \cdot Q^3 + P_B \cdot b_2 \cdot \left(\frac{f_N}{f}\right)^2 \cdot Q^2 + \left[P_B \cdot c_2 \cdot \frac{f_N}{f} - \rho g H \right] \cdot Q + P_B \cdot d_2 = 0 \quad (1.36)$$

1.9.5 Influência das curvas de isorrendimento aos valores de vazão e frequência de rotação

Entretanto, essas fórmulas podem fornecer valores indesejáveis da frequência e vazão que são incoerentes com as características da motobomba, como valores negativos ou acima do nominal. Logo, Santos (2022) utilizou o conceito das curvas parabólicas de isorrendimento para estabelecer um limite nos valores da frequência e vazão, por intermédio dos pontos de operação extremos da curva de performance da motobomba.

Utilizando a Equação (1.9), foi possível desenvolver a Equação (1.37).

$$Iso = \frac{Q^2}{H} \quad (1.37)$$

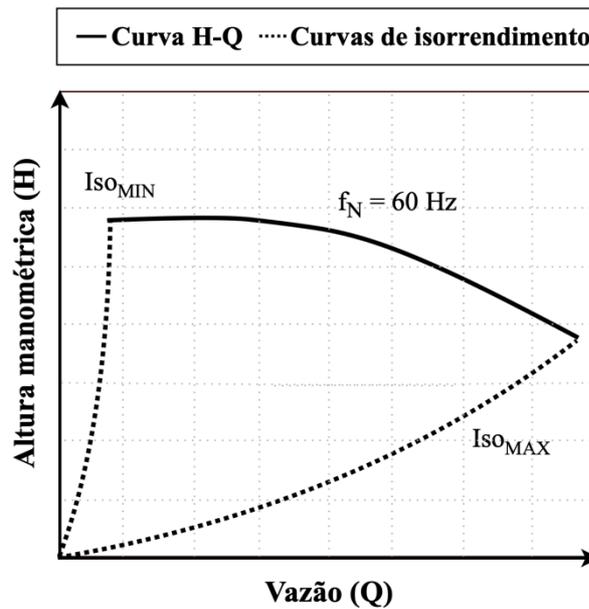
onde Iso é a constante da relação entre o quadrado da vazão com a altura manométrica em regiões de mesma eficiência.

Utilizando os pontos de operação extremos da curva de performance da motobomba, encontra-se dois valores para a constante de iso-eficiência: Iso_{MAX} e Iso_{MIN} . Tais valores, formados pelas Equações (1.38) e (1.39), criam duas funções da Equação (1.37), cuja área entre elas é a zona de valores congruentes de Q e f, como mostra a Figura 1.16. Observa-se que quanto menor for a frequência de operação da motobomba, menor será a faixa dos valores que Q pode assumir.

$$Iso_{MAX} = \frac{Q_{MAX}^2}{H_{MIN}} \rightarrow H = \frac{1}{Iso_{MAX}} \cdot Q^2 \quad (1.38)$$

$$Iso_{MIN} = \frac{Q_{MIN}^2}{H_{MAX}} \rightarrow H = \frac{1}{Iso_{MIN}} \cdot Q^2 \quad (1.39)$$

Figura 1.16 – Limitação dos valores de Q e f pelas curvas de isorrendimento.



Fonte: Elaborado pelo autor.

1.9.6 Aquisição do PMES

No final, cada elemento de $\mathbf{H} = \{H_1, \dots, H_j, \dots, H_m\}$ gera um conjunto de $\mathbf{Q} = \{Q_1, \dots, Q_i, \dots, Q_n\}$ e $\mathbf{f} = \{f_1, \dots, f_i, \dots, f_n\}$, em que é possível calcular a eficiência do sistema para cada simulação da altura manométrica, que totaliza o conjunto $\boldsymbol{\eta}_s = \{\eta_{s1}, \dots, \eta_{sj}, \dots, \eta_{sm}\}$, da mesma quantidade de elementos de \mathbf{H} . O cálculo para obter cada elemento de $\boldsymbol{\eta}_s$ é feito pela Equação (1.40), resultado da relação entre o somatório da energia hidráulica da bomba com a energia gerada pelo GFV para o DCP durante o dia.

$$\eta_{sj} = \frac{\rho g H_j \cdot \sum_{i=1}^n Q_{ij}}{\sum_{i=1}^n P_{FVi}} \quad (1.40)$$

Após isso, realiza-se uma comparação entre os elementos de $\boldsymbol{\eta}_s$ para determinar qual elemento de \mathbf{H} culminou na maior eficiência do sistema. Essa altura manométrica indica o ponto otimizado para a bomba obter a máxima eficiência energética no fornecimento de água utilizando o sistema fotovoltaico. Para isso, a curva do sistema do poço do projeto deve estar igual ou próxima ao indicado pelo PMES.

2 DESCRIÇÃO DOS SISTEMAS FOTOVOLTAICOS DE BOMBEAMENTO E DA BANCADA

Por meio da revisão bibliográfica, foi possível entender a diferença entre o ponto máximo de eficiência e o de eficiência solar, onde o primeiro é indicado nas informações disponibilizadas pelas fabricantes e o segundo é obtido por meio de cálculos analíticos e considera a influência da irradiância na velocidade de rotação da motobomba, e assim, no desempenho geral durante o dia.

Neste capítulo, utilizou-se o método descrito por Santos (2022) para encontrar o PMES e foi aplicado em três diferentes sistemas fotovoltaicos de bombeamento (SFB), compostos por diferentes dispositivos de condicionamento de potência (DCP) e geradores fotovoltaicos (GFV), porém com uma única motobomba centrífuga, de motor de indução trifásico, caracterizados posteriormente.

Além disso, retratou-se o breve detalhamento da bancada de ensaios para a atuação do controle de pressão, além do funcionamento dos equipamentos elétricos que o compõe. O trabalho envolveu a medição de seis grandezas: vazão e pressão exercidas sobre os SFB; e tensão, corrente, irradiância e temperatura aproximada da célula fotovoltaica que pairam sobre os geradores.

2.1 Sistema de controle de pressão da bancada de ensaios

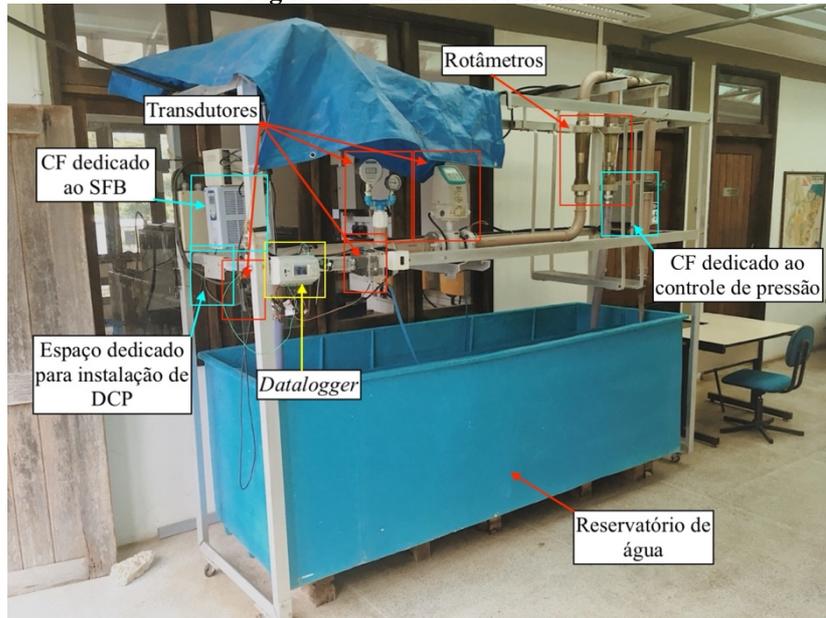
A bancada está situada no laboratório do Grupo de Estudos e Desenvolvimento de Alternativas Energéticas (GEDAE), na Universidade Federal do Pará (UFPA). A partir dela, são conduzidas simulações de alturas manométricas em SFB, mediante manutenção de uma pressão constante durante os testes. Devido a essa abordagem, o estudo não é adequado para poços com variações significativas no nível de água, como os poços tubulares, pois o rebaixamento afeta a pressão exercida na bomba. Portanto, essa metodologia é mais apropriada para poços de maior diâmetro, como os do tipo Amazonas. Além disso, para os cálculos futuros neste trabalho, considerou-se as perdas de carga na tubulação (J) como desprezíveis, e a altura manométrica total (H) foi considerada equivalente à altura manométrica dinâmica (H_D), assim a Equação (1.5) é modificada para (2.1).

$$H \approx H_D \text{ [mca]} \quad (2.1)$$

Para o controle de pressão da bancada de ensaios são utilizados um conversor de frequência convencional e uma motobomba de 3 cv. Há um sistema de controle proporcional integral e derivativo (PID) de malha fechada para manter a pressão fixa em um valor

determinado pelo usuário. A bancada apresenta um reservatório de água pequeno, para o reaproveitamento de água, e uma estrutura elaborada por perfis metálicos de alumínio, com suportes para os equipamentos de medição, de proteção, o sistema de tubulação que interconecta o sistema fotovoltaico de bombeamento e o simulador de pressão, e os DCP (Figura 2.1).

Figura 2.1 – Bancada de ensaios.



Fonte: Silva (2019).

Tanto a motobomba do SFB quanto a do simulador de pressão ficam instaladas horizontalmente dentro do reservatório (Figura 2.2). O sistema de tubulação que as interliga é constituído de tubos de policloreto de vinila e mangueiras. O reservatório de água possui uma divisória entre as motobombas, porém não as isolam, possuindo aberturas para a passagem de água.

Figura 2.2 – Posição das motobombas submersas no interior do reservatório de água.

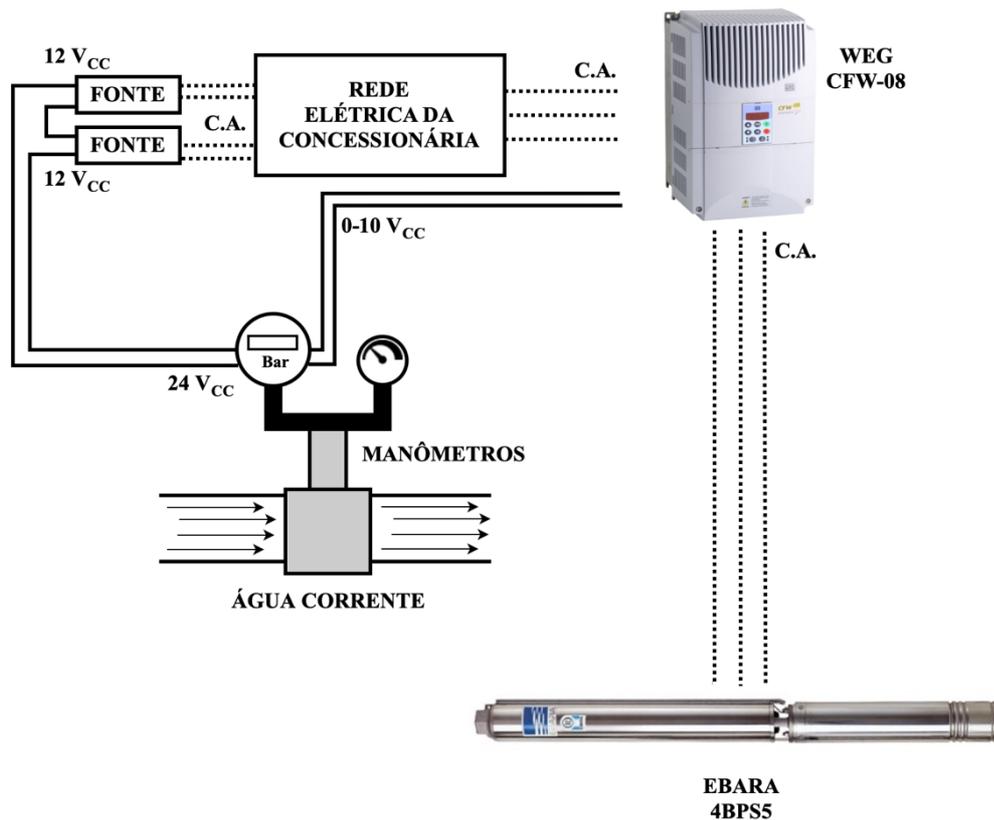


Fonte: Silva (2019).

Para simular a altura manométrica da bancada, foi utilizado o conversor de frequência da fabricante WEG, o CFW-08, ligado à rede elétrica da concessionária local, com tensão em corrente alternada na faixa de 200-240 V_{AC} (WEG S.A., 2019), e a motobomba modelo 4BPS5-18, de 18 estágios, da fabricante Ebara. O modelo possui suporte a alturas manométricas de até 160 mca e vazão de até 6 m³/h no bombeio de água, indicada para poços de elevada profundidade ou em sistemas de pressurização (Ebara Ltda., 2019).

No controle de pressão, é definido um valor desejado como referência na parametrização, e o CFW-08 tem como objetivo manter a pressão tão próxima quanto possível. Na configuração de malha fechada, há uma realimentação constante do estado atual do sistema, enviado por um manômetro digital ao CFW-08, que compara o sinal de saída com a referência e gerando um erro. O controle PID busca reduzir esse erro ao máximo, e quando o erro tende a zero, indica que a pressão do sistema está próximo ao valor desejado. A Figura 2.3 mostra o esquemático do sistema de controle de pressão.

Figura 2.3 – Diagrama do sistema de controle da pressão com o CFW-08 e a motobomba Ebara 4BPS5.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Para a aquisição dos dados de pressão para o controle PID, foram acoplados dois manômetros no sistema de tubulação: um digital, RMD-420, da empresa *Rücken*, juntamente com um analógico sem identificação da fabricante (Figura 2.4). O RMD-420 envia dados

mensurados em sinais de tensão em corrente contínua de 0-10 V_{CC} e é direcionado ao dispositivo de aquisição de dados e a realimentação do CFW-08 para o controle da pressão.

Figura 2.4 – Manômetros digital e analógico.



Fonte: Elaborada pelo autor do trabalho.

O manômetro analógico atuou como referência e auxílio na identificação de erros de medição. O transdutor digital possui leitura de pressão na unidade Bar e o analógico em duas unidades: Quilograma-força por Centímetro Quadrado (kgf/cm²) e em Libra-força por Polegada Quadrada (psi – *pound-force per square inch*). A conversão das unidades fornecidas pelos manômetros é mostrada abaixo.

$$10 \text{ mca} = 1 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} \cong 0,98 \text{ bar} \cong 14,22 \text{ psi} \quad (2.2)$$

2.2 Geradores fotovoltaicos

Para os testes aplicados neste trabalho, utilizaram-se dois GFV para compor os diferentes SFB, localizados na área externa do GEDAE. Com o intuito de verificar os parâmetros de referência declarados pelas fabricantes, optou-se pela utilização de um equipamento para execução de testes sobre as curvas de corrente pela tensão e de potência pela tensão – respectivamente I-V e P-V. O Solar I-Ve (Figura 2.5), da fabricante HT permite a verificação da característica dos painéis solares, por meio da conexão direta do aparelho no GFV, com a medição de corrente e tensão do GFV.

Por meio do *datalogger* SOLAR02 (dispositivo de aquisição de dados), as informações relativas de irradiância e temperatura são captadas simultaneamente para as inspeções realizadas pelo Solar I-Ve. Os dados são extrapolados para as condições padrão de ensaios (STC) e, com isso, comparados com as especificações da fabricante dos módulos, determinando

o nível aproximado da degradação do gerador fotovoltaico com o tempo de uso (HT, 2017; HT, 2022).

Figura 2.5 – Solar I-Ve e o SOLAR02.



Fonte: Elaborado pelo autor, adaptado de HT (2023).

As informações relacionadas sobre a irradiância e temperatura de operação da célula foram retiradas de sensores próprios da fabricante: uma célula fotovoltaica de referência HT304N; e um sensor de temperatura PT300N (Figura 2.6). A célula é instalada em uma das hastes de suporte do GFV com a mesma inclinação e direção, enquanto o PT300N é acoplado na parte posterior do gerador. Ressalta-se que ambos foram somente utilizados para obter as curvas I-V dos geradores.

Figura 2.6 – HT304N (a) e PT300N (b).



Fonte: HT (2023).

2.2.1 Gerador fotovoltaico SolarWorld SW245

O primeiro gerador fotovoltaico é mostrado na Figura 2.7, da fabricante SolarWorld, com um arranjo de 10 módulos, de modelo SW245, com 245 W_p de potência cada, e na

pesquisa, utilizaram-se combinações de 8, 9 e 10 módulos, todos combinados em série, de acordo com a demanda do DCP e o objetivo do trabalho. O gerador foi instalado em uma estrutura com suportes de alumínio e ferro. O azimute está voltado ao norte magnético e inclinação aproximada de 12°.

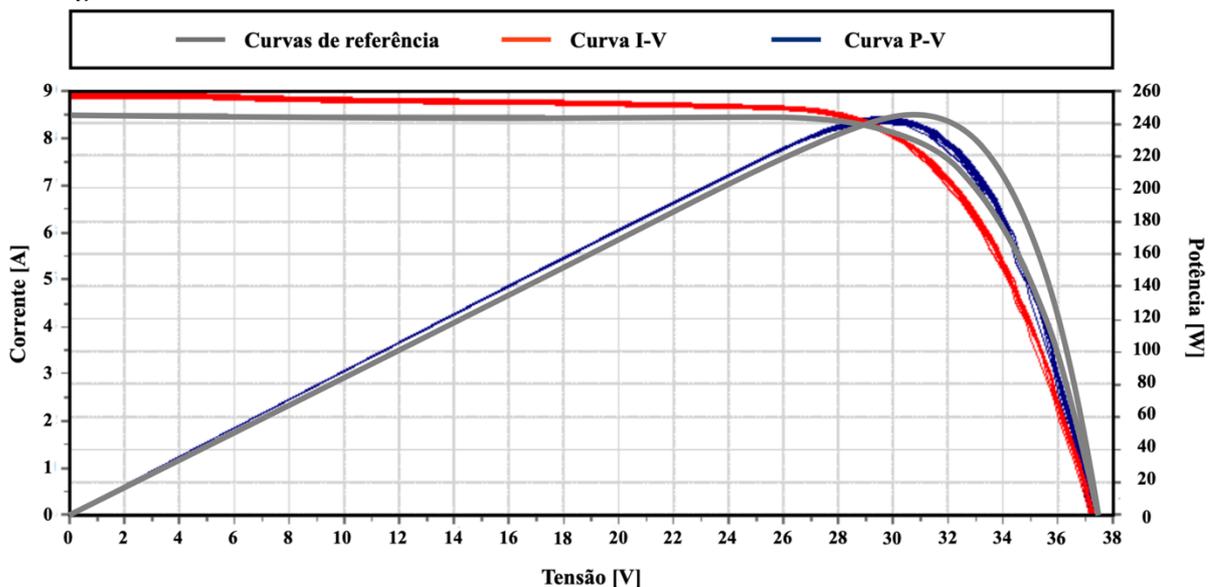
Figura 2.7 – Gerador fotovoltaico de 10 módulos SW245 da Solarworld.



Fonte: Elaborado pelo autor.

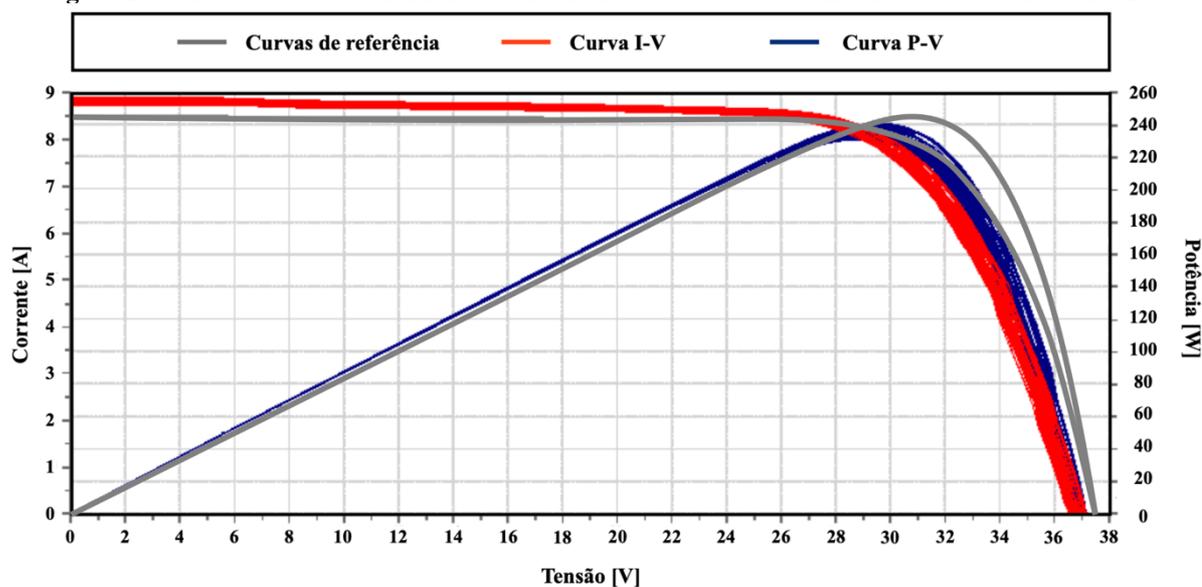
Por meio da Figura 2.8 e da Figura 2.9 é apresentado o resultado da análise das características I-V, o Solar I-Ve foi conectado nos 10 módulos que foram utilizados no trabalho. Para o aumento da confiabilidade do equipamento, foram feitas ao todo 63 medições, as quais foram organizadas em duas faixas de irradiância: entre 700-900 W/m² e 900-1100 W/m², com 12 e 51 medições respectivamente. As curvas em cinza representam as curvas I-V e P-V extrapoladas automaticamente em STC, de acordo com os dados nominais dos módulos introduzidos pelo usuário.

Figura 2.8 – Curvas I-V e P-V nas faixas de irradiância de 700-900 W/m² médias dos módulos SW245.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 2.9 – Curvas I-V e P-V nas faixas de irradiância de 900-1100 W/m² médias dos módulos SW245.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Ao final das medições, houve divergência das informações para os dados de 700-900 W/m² e de 900-1100 W/m² de irradiância. A Tabela 2.1 mostra os parâmetros elétricos baseados no *datasheet* de *SolarWorld* (2011) e os adquiridos com as medições. Para faixa de 700-900 W/m² a mediana é de 241,87 W_P, cerca de 1,28 % inferior ao valor do catálogo, a qual era de 245 W_P. Porém, na faixa de 900-1100 W/m², registrou-se a mediana de 233,8 W_P (cerca de 4,57 % inferior ao valor do catálogo).

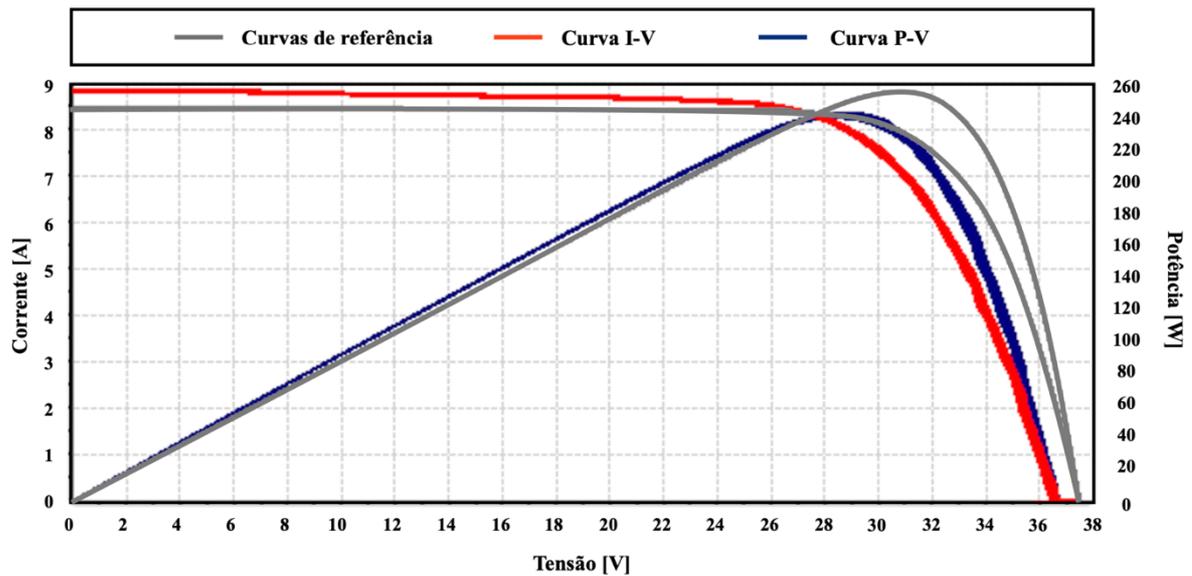
Tabela 2.1 – Comparação dos parâmetros elétricos do GFV SW245.

GFV SW245			
Parâmetros	STC	700-900 W/m ²	900-1100 W/m ²
Potência máxima nominal (P _{MP})	245 W _P	241,87 W _P	233,8 W _P
Corrente de máxima potência (I _{MP})	7,96 A	8,08 A	8,04 A
Tensão de máxima potência (V _{MP})	30,8 V	29,92 V	29,08 V
Corrente de curto-circuito (I _{SC})	8,49 A	8,93 A	8,79 A
Tensão de circuito aberto (V _{OC})	37,5 V	37,34 V	36,58 V
Coefficiente variação de potência máxima (γ _{MP})		-0,48%/°C	

Fonte: Elaborado pelo autor.

Entretanto, o GFV fica a uma distância considerável do dispositivo de condicionamento de potência, logo, há quedas na tensão do barramento c.c. pelo cabeamento. Com isso, realizou-se também testes considerando a distância do GFV ao DCP, ligando o Solar I-Ve pelo cabo, com o resultado mostrado na Figura 2.10. Elaboraram-se 40 medições com esta situação, em irradiâncias de 980 até 1040 W/m².

Figura 2.10 – Curvas I-V e P-V nas faixas de irradiância de 980-1040 W/m², ao considerar a distância do cabo elétrico.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Com base nas medianas dos dados disponíveis na Tabela 2.2, verificou-se que uma perda aproximada na tensão de máxima potência de aproximadamente 0,4 V por módulo fotovoltaico, em comparação aos dados obtidos com as curvas de 900-1100 W/m² do primeiro teste, mantendo o valor de corrente de máxima potência. Com essa queda de tensão, foi observado uma queda na máxima potência nominal do GFV de 2,88 W_P para cada módulo, em cerca de -1,23 % dos 233,8 W_P da primeira medição.

Tabela 2.2 – Parâmetros elétricos do GFV SW245 considerando as perdas com o cabo.

GFV SW245		
Parâmetros	STC	980-1040 W/m ²
Potência máxima nominal (P _{MP})	245 W _P	230,92 W _P
Corrente de máxima potência (I _{MP})	7,96 A	8,07 A
Tensão de máxima potência (V _{MP})	30,8 V	28,62 V
Corrente de curto-circuito (I _{SC})	8,49 A	8,82 A
Tensão de circuito aberto (V _{OC})	37,5 V	36,58 V
Coefficiente variação de potência máxima (γ _{MP})		-0,48%/°C

Fonte: Elaborado pelo autor.

A partir disso, para esta pesquisa, utilizou-se o valor de 230,92 W_P para a potência base dos módulos do gerador aplicadas nas simulações do MATLAB, resultando em GFV próximo de 2310 W_P para 10 módulos, 2080 W_P para 9 módulos e 1850 W_P para 8 módulos.

2.2.1.1 Gerador fotovoltaico Solaris S55P

O segundo GFV é da fabricante Solaris, composto por 20 módulos de modelo S55P, de potência nominal de 55 W_P cada. Contudo, devido a falhas de sobretensão no conversor de frequência usado no SFB, foram empregados 18 módulos. A estrutura é composta por hastes

de alumínio, com o azimutal direcionado para o norte magnético, com inclinação de 14° (Figura 2.11).

Figura 2.11 – Gerador fotovoltaico de 20 módulos S55P da Solaris.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Em Silva (2019), realizou-se a aquisição da curva I-V de cada módulo do GFV, por intermédio do medidor *Pasan Measurement Systems*, classe A+A+A+, localizado no GEDAE, que resultou em um gerador de $970 W_P$ com o uso de 18 módulos, com perda média de 2 % do nominal. A Tabela 2.3 evidencia a diferença nos parâmetros do GFV Solaris S55P. Os dados provenientes do SFB que compõe o Solaris S55P, para a análise desse trabalho, foram obtidos no ano de 2019, no trabalho de Silva (2019), devido à deterioração do gerador fotovoltaico atualmente, que impossibilitou a realização dos ensaios com sua atual potência máxima.

Tabela 2.3 – Parâmetros elétricos do GFV S55P.

GFV S55P		
Parâmetros	STC	Mensurado
Potência máxima nominal (P_{MP})	55 W_P	$\sim 53,88 W_P$
Corrente de máxima potência (I_{MP})	3,04 A	$\sim 3,06 A$
Tensão de máxima potência (V_{MP})	18,20 V	$\sim 17,58 V$
Corrente de curto-circuito (I_{SC})	3,24 A	-
Tensão de circuito aberto (V_{OC})	21,85 V	-
Coefficiente variação de potência máxima (γ_{MP})		-0,5%/°C

Fonte: Silva (2019).

2.3 Motobomba

No catálogo da fabricante Leão S.A. (2023) é disposto alguns pontos de trabalho da motobomba para demonstrar o desempenho da 4R5PA (Tabela 2.4).

Tabela 2.4 – Pontos de operação nominais da Leão 4R5PA

Motobomba Leão 4R5PA								
Altura manométrica [mca]	21,5	26,5	34,5	43,5	50	55	56,5	62,5
Vazão [m^3/h]	6,5	6	5	4	3	2	1,5	0

Fonte: Elaborado pelo autor, adaptado de Leão S.A. (2023).

2.3.1 Determinação da curva de eficiência do motor

A motobomba possui um motor de indução trifásico MB4 e uma bomba de potência nominal (P_{NOM}) de 1 cv (735,5 W). Não há informações disponibilizadas sobre a eficiência do motor desse modelo, logo, para o prosseguimento deste trabalho, estimou-se os dados por meio das curvas típicas apresentadas na Figura 1.15, para motobombas de 1 HP (aproximadamente 1,014 cv).

Contudo, conforme evidenciado na figura, a eficiência do motor adotada foi próxima a 97 % de seu carregamento (valor nominal, exibido na placa ou catálogo do produto). A curva η_M precisa então ser recalibrada para a eficiência do motor nominal atribuída ao modelo MB4, porém essa informação específica não é disponibilizada pela fabricante Leão.

Por conta disso, há algumas formas para determinar o seu valor. Nesta pesquisa, considerou-se as informações de outros modelos da proprietária da fabricante, disponibilizadas no seu catálogo (Franklin Electric S.A., 2015; Franklin Electric S.A., 2017). Ao observar alguns produtos semelhantes, determinou-se uma eficiência típica para o motor de 70 %. Todavia, devido ao desgaste da motobomba com o tempo, entende-se que essa eficiência do motor pode ser ainda menor. Por intermédio da interpolação da curva típica de 1 HP, realizou-se a calibração da curva de η_M e a aquisição dos coeficientes k_0 , k_1 e k_2 , apresentados na Tabela 2.5.

Tabela 2.5 – Valores dos coeficientes relacionados às perdas do motor para a curva de 1 HP.

k_0	k_1	k_2
0,1905	0,2253	0,0061

Fonte: Elaborado pelo Autor.

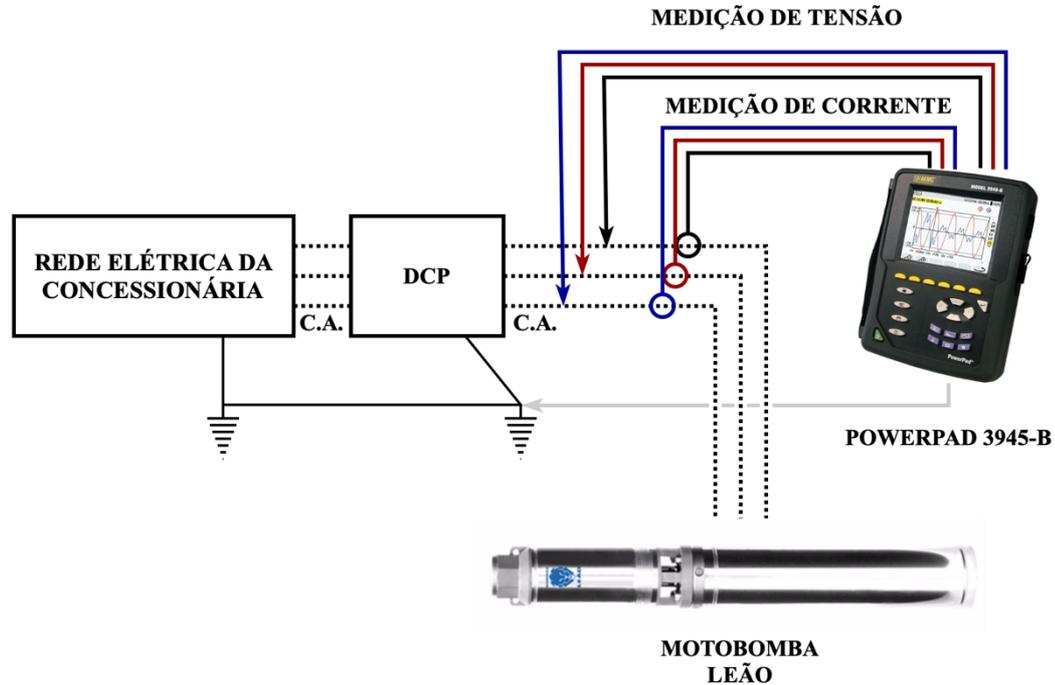
2.3.2 Determinação da curva de eficiência da bomba

Como descrito no Capítulo 1, a obtenção da curva de eficiência da bomba (η -Q) requer traçar diferentes pontos de η_B , resultantes de várias alturas manométricas (H), com o uso da Equação (1.18). Esse processo é conduzido mantendo a operação constante da motobomba em frequência nominal (f_N), por meio da conexão à rede elétrica fornecida pela concessionária. Para aplicar a equação, é necessário possuir informações sobre cada ponto de altura manométrica e suas correspondentes vazões em frequência nominal (Q_f), potências requeridas pelo motor (P_M), bem como os níveis de carregamento de carga (LF) para determinar as eficiências do motor de cada ponto de operação.

O cálculo de P_M foi obtido com o uso do analisador de energia trifásico PowerPad 3945-B, da fabricante AEMC *Instruments*, e distribuído pela Megabras. (Figura 2.12), a qual forneceu

os valores de tensão, corrente e fator de potência trifásicos. Pela Equação (1.20), foi possível estipular P_M para cada H.

Figura 2.12 – Esquemático do PowerPad 3945-B conectado ao sistema de bombeamento conectado à rede.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para determinar o fator de carga usando a Equação (1.19), é necessário calcular a potência exigida pelo motor se este operasse em sua capacidade de carga nominal (P_{MRN}) para a bomba Leão 4R5PA, com a opção de uso tanto da Equação (1.20) quanto da (1.21). A primeira exige informações sobre tensão, corrente e fator de potência, porém apenas as duas primeiras estão disponíveis no catálogo da fabricante Leão. Portanto, a Equação (1.21) foi empregada para uma estimativa de P_{MRN} , considerando P_{NOM} de 1 cv e η_M padrão de 70 %:

$$P_{MRN} = \frac{P_{NOM} \cdot 735,5}{\eta_M} = \frac{1 \cdot 735,5}{0,7} \cong 1050 \text{ W} \quad (2.3)$$

Os resultados de cada parâmetro essencial para a determinação da eficiência da bomba estão apresentados na Tabela 2.6. Foram conduzidos nove ensaios abrangendo uma faixa de 20,2 a 62 mca, dentro da capacidade suportada pela motobomba Leão 4R5PA. Esses ensaios geraram nove pontos referentes para η_B , permitindo a construção de uma curva aproximada dessa eficiência.

Tabela 2.7 – Valores das constantes para a motobomba de referência.

Modelo	Valores das constantes
Leão 4R5-PA	$a_1 = -0,7326$
	$b_1 = -1,9888$
	$c_1 = 61,765$
	$a_2 = -0,000006$
	$b_2 = -0,0367$
	$d_2 = 0,001$

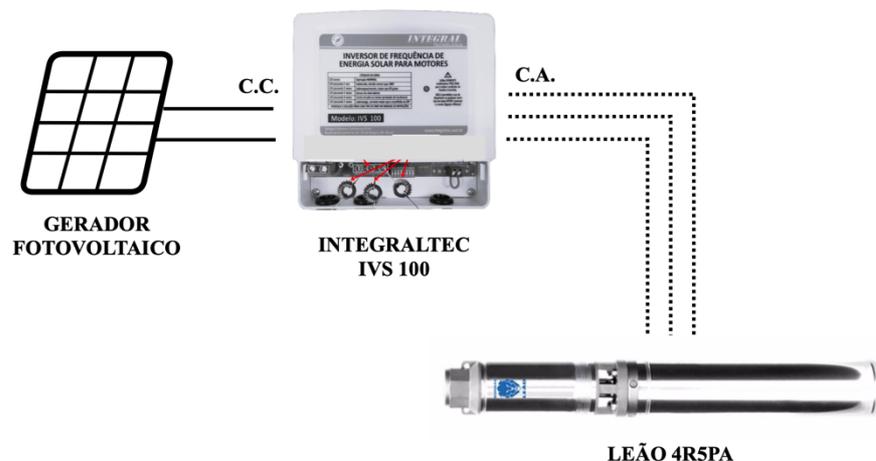
Fonte: Elaborado pelo autor.

2.4 Configurações dos sistemas fotovoltaicos de bombeamento

Neste trabalho, três SFB foram analisados, por intermédio de três dispositivos de condicionamento de potência, dois geradores fotovoltaicos, e uma motobomba. As instalações ocorreram na área de testes no GEDAE, localizado no campus Guamá da UFPA. Os dois sistemas são identificados a partir da ordem descrita neste trabalho, a fim de facilitar a identificação pelo leitor: SFB 1, SFB 2, e SFB 3.

2.4.1 Configuração do SFB 1

Sistema constituído pelo *drive* solar da fabricante Integraltec com a motobomba Leão, tal como mostra a Figura 2.14. Para suprir a demanda de 1 cv (735,5 W) da potência nominal da motobomba, o DCP sugere um gerador composto por seis módulos de 330 W_p, com a soma em 1980 W_p. No entanto, para este trabalho, utilizou o GFV de 8 módulos SW245, com potência total de 1850 W_p, semelhante ao requerido pelo *drive*.

Figura 2.14 – Representação do conjunto SFB 1.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Dentre os DCP, o Integraltec possui características mais simples, sem interface de acesso para o usuário, e as parametrizações são realizadas por meio de oito pequenas chaves selecionadoras que regulam a tensão, forma de controle, algumas proteções etc. Esse modelo é

indicado para potências de motobomba de 3 cv, e o controle do nível de potência a ser enviada para a motobomba está dividida em baixa (para corrente de até 8 A) e alta (até 10 A). Outras especificações elétricas estão na Tabela 2.8. O controlador solar precisa de uma tensão mínima de $180 V_{CC}$, para iniciar o funcionamento, com suporte máximo de $450 V_{CC}$.

Dos três DCP utilizados no estudo, apenas o conversor de frequência, que será detalhado posteriormente, tem sua eficiência especificada em 97%. Esse valor foi adotado para os outros dois controladores, a fim de simplificar o uso do código, que se mantém próximo ao valor mencionado por Santos (2022), de 95 %.

Tabela 2.8 – Parâmetros técnicos do *drive* solar Integraltec IVS 100.

Integraltec IVS 100	
Tensão de entrada máxima	450 V_{CC}
Tensão mínima de operação	180 V_{CC}
Corrente nominal	10 A
Tensão de saída	220 V_{CA}
Tipos de controle	Escalar V/F e PWM senoidal

Fonte: Integraltec (2022).

2.4.2 Configuração do SFB 2

Teste realizado com o DCP solar da empresa brasileira Intelbras, modelo DS 3220, cujas especificações estão detalhadas na Tabela 2.9. Para atender à demanda de 1 cv (735,5 W) da motobomba, o DCP requer uma potência mínima equivalente à do IVS 100, aproximadamente 1980 W_p . Para adequar a tensão de corrente alternada trifásica da motobomba, de 230 V_{CA} , o controlador necessita de uma tensão de barramento c.c. do gerador fotovoltaico de cerca de 286 V_{CC} , e não suprir esta tensão pode resultar em desempenho aquém do esperado para o SFB. Inicialmente, foram utilizados oito módulos em série do SW245, com P_{MP} de 1850 W_p .

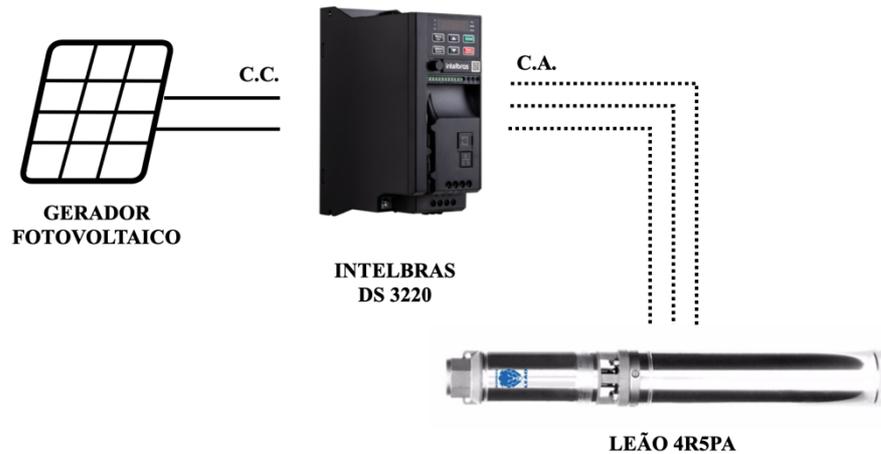
Tabela 2.9 – Parâmetros técnicos do *drive* solar Intelbras DS 3220.

Intelbras DS 3220	
Potência nominal de saída	2,2 kW
Máxima corrente de saída	10 A
Faixa de tensão de operação	170 - 400 V_{CC}
Potência máxima suportada	2,8 kW_p
Faixa de frequência	0-600 Hz
Frequência configurada	60 Hz
Tensão fotovoltaica (V_{CC})	286 V

Fonte: Intelbras S.A. (2022).

O controlador possui maiores quantidades de parametrizações, a qual é possível incluir especificações da motobomba, como o sistema irá atuar, incluir o seguimento do ponto de máxima potência (SPMP), entre outros (Intelbras S.A., 2022). Isso aumenta a confiabilidade e a segurança durante o funcionamento. Na Figura 2.15 é apresentada a representação do SFB 2. Para esse controlador, também foi presumida uma eficiência de 97 %.

Figura 2.15 – Representação do conjunto SFB 2.

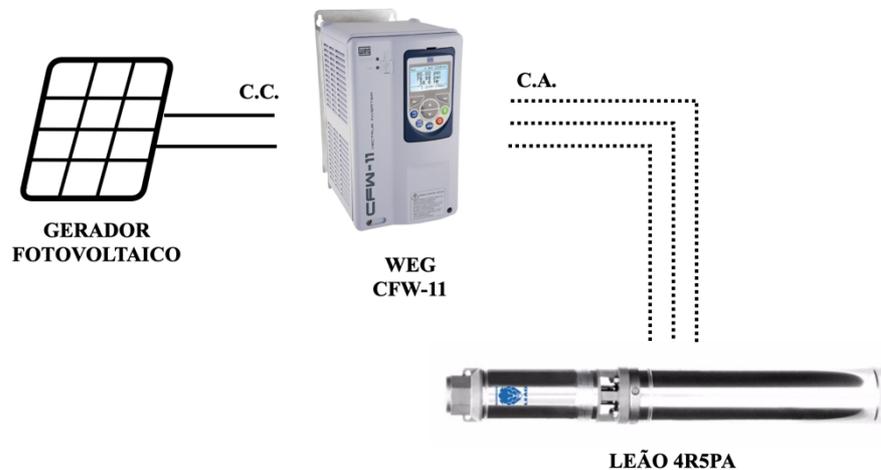


Fonte: Elaborado pelo autor.

2.4.3 Configuração do SFB 3

O terceiro sistema fotovoltaico de bombeamento utiliza um DCP diferente, um conversor de frequência, o CFW-11, da fabricante WEG, com tensão de operação na faixa de 200-240 VCA, conectado a motobomba Leão 4R5PA, representados no esquemático feito por Silva (2019) da Figura 2.16.

Figura 2.16 – Representação do conjunto SFB 3.



Fonte: Silva (2019).

O CF não é um equipamento adequado ao SFB, logo, não possui tecnologias de SPMP. Não há indicações da potência do GFV para suprir a motobomba por parte da fabricante. Em Alonso-Abela, Chenlo e Blanco (2002), citado por Santos (2016, p.63), é estimado que um GFV deva ter uma potência de pico nominal 1,15 vezes maior que a potência requerida pela motobomba com o nível de carregamento nominal. Ao considerar a potência estimada para o motor em 100 % de carga ($P_{MRN} = 1050 \text{ W}$), a potência máxima do GFV deveria estar próxima a 1207,5 W_p . No trabalho de Silva (2019), devido à indisponibilidade de um gerador de potência

próxima ao calculado, utilizou-se o GFV de 18 módulos S55P de potência máxima nominal de 970 W_P.

Para garantir uma tensão nominal do conversor de frequência de 200-240 V_{CA}, o barramento c.c deve estar em uma faixa de 282-338 V_{CC} (Silva, 2019). O CFW-11 suporta a tensão máxima de 400 V_{CC}, com proteção de sobretensão acima desse valor. Dessa forma, o GFV tem uma tensão de máxima potência (V_{MP}) na faixa de 327,6 V_{CC} e tensão de circuito aberto (V_{OC}) abaixo de 393,3 V_{CC} (Tabela 2.10), impedindo a atuação da falha de sobretensão no CFW-11. A eficiência do DCP é de 97 % de acordo com a fabricante (WEG S.A., 2020).

Tabela 2.10 – Parâmetros técnicos do conversor de frequência WEG CFW-11.

WEG CFW-11	
Tensão de entrada máxima	400 V _{CC}
Tensão mínima de operação	223 V _{CC}
Corrente nominal de saída	7 A
Tensão de saída	220 V _{CA}
Tipos de controle	A depender da parametrização

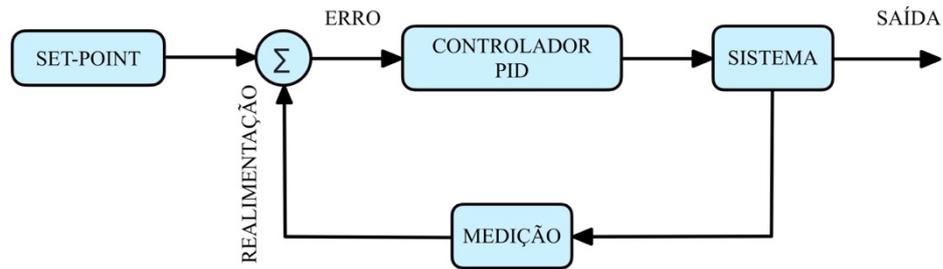
Fonte: WEG S.A. (2020).

2.4.3.1 Estratégias de operação do CF

Embora já existam diversos modelos de CF convencional no mercado com essa funcionalidade, o CFW-11 tem como grande desvantagem a indisponibilidade do circuito de SPMP, que aumenta o rendimento de um SFB. A partir desta situação, criaram-se estratégias para garantir um desempenho aceitável do CF e motobomba, seja por intermédio da criação de circuitos externos acoplados no CF, seja com parametrizações. Em Silva (2019), foi recorrido ao uso da estratégia de manter a tensão do barramento c.c. fixa, mediante o controle PID de malha fechada, semelhante ao que foi aplicado para o controle de pressão da bancada de ensaios.

Como é explicado nos trabalhos de Brito (2006) e Silva (2019), o controlador PID condiciona o motor de indução da motobomba para manter a estabilidade do sinal de referência, o *set-point*, regulando a sua frequência de rotação à medida que perturbações afetem o sistema. Isso é possível com o auxílio de uma realimentação no sistema de controle, como mostra a Figura 2.17. O PID mantém a tensão do barramento c.c. (variável de processo) próxima ao *set-point* configurado, através do sinal de realimentação, de modo a condicionar o erro próximo a zero.

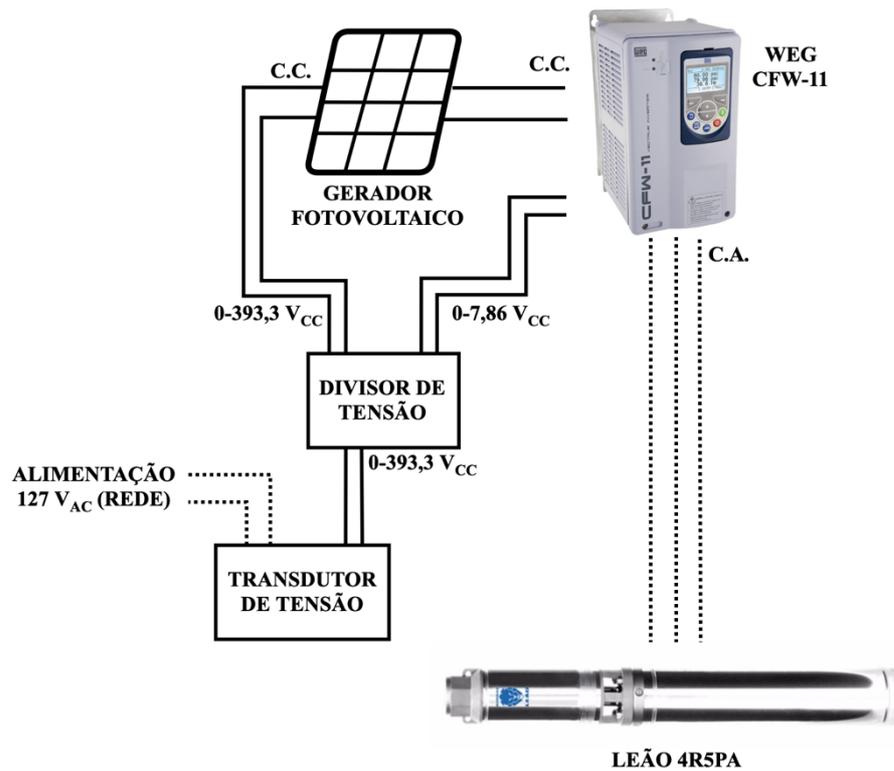
Figura 2.17 – Diagrama de blocos simples do controlador PID de malha fechada.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A realimentação do sistema é adquirida por meio da tensão do GFV, limitada a uma faixa por um divisor de tensão para a entrada de realimentação do CF, de até $10 V_{CC}$. Ele possui um resistor de $19,7 \text{ k}\Omega$ e outro de $1 \text{ M}\Omega$, onde a tensão do primeiro irá ao CFW-11 e a tensão do somatório seguirá para o transdutor de tensão (Figura 2.18).

Figura 2.18 – Diagrama de realimentação do CFW-11 para o controle PID.

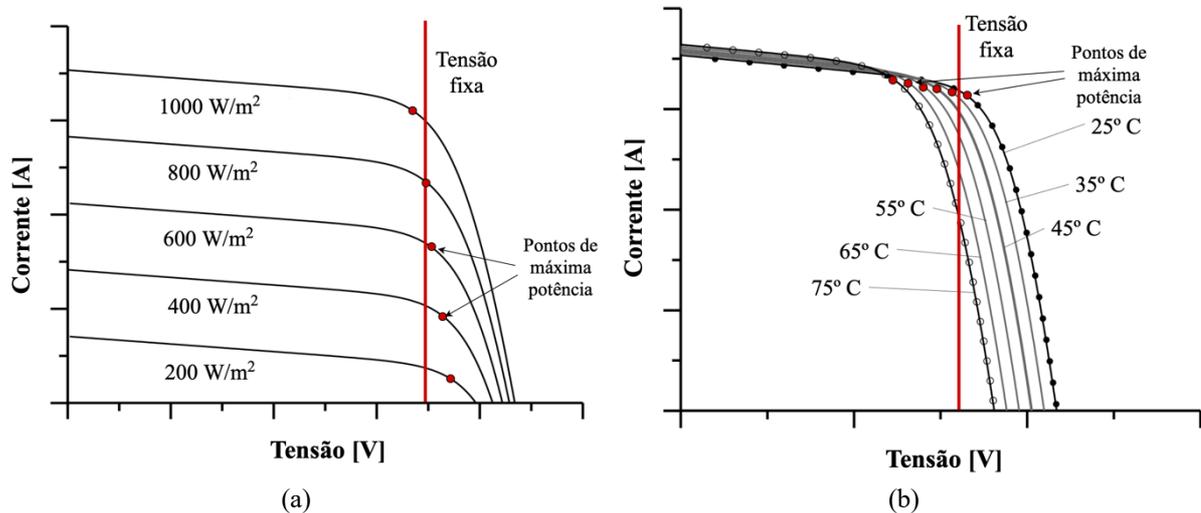


Fonte: Elaborado pelo autor.

A estratégia de fixar a tensão do barramento c.c. é simples, no entanto, devido à intermitência da irradiância e temperatura do módulo ao longo do dia, o SFB irá operar fora do ponto de máxima potência em muitos momentos do dia (Brito, 2006; Santos, 2016), diferente de um SPMP que constantemente atualiza o ponto de operação da curva I-V, como é retratada na Figura 2.19. De modo a diminuir esse efeito, é preciso utilizar níveis de tensão mais adequados para o bombeamento. Em Silva (2019), com o auxílio do gráfico de distribuição de

energia da região de Belém, a faixa de tensão utilizada no GFV ficou entre 250-280 V_{CC}. No entanto, embora sejam valores com maiores contribuições na produção de energia, são valores inferiores a faixa requerida para o CFW-11, logo, pode influenciar no desempenho do sistema.

Figura 2.19 – Ação da tensão fixa com a variação do ponto de máxima potência do GFV em relação a irradiância (a); temperatura (b).



Fonte: Elaborado pelo autor.

2.5 Sistema de medição e aquisição de dados da bancada

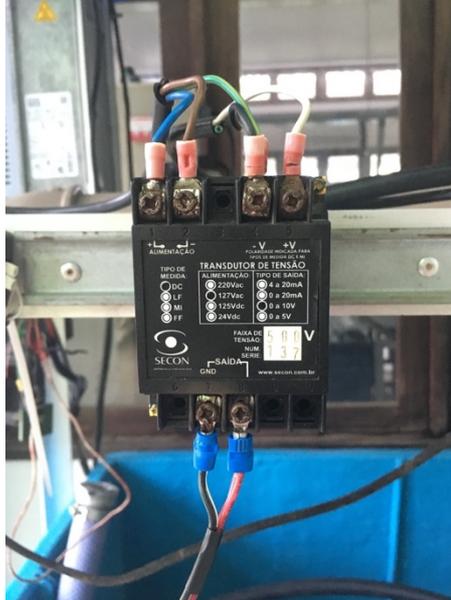
Os transdutores têm como objetivo converter as grandezas físicas (vazão, pressão, entre outras) do sistema fotovoltaico de bombeamento em sinais elétricos de tensão, corrente ou resistência elétrica, os quais são coletados em um *datalogger* para aquisição de dados. Os resultados providos são salvos em arquivo *xlsx*, da planilha do programa *Microsoft Office Excel*, e analisados para a comparação com a simulação da metodologia desse trabalho. Ao todo há seis tipos de transdutores ligados ao dispositivo de aquisição de dados: tensão, corrente, pressão, vazão, irradiância e temperatura. Os quatro primeiros estão localizados nas hastes metálicas que compõe a bancada, enquanto os outros dois estão próximos ao GFV S55P.

Por conta da distância entre o gerador fotovoltaico dos módulos SW245 e o *datalogger*, houve dificuldades para realizar a medição de irradiância e temperatura de operação da célula com os mesmos equipamentos presentes no S55P. Com isso, algumas informações utilizadas para a pesquisa foram provenientes de dados de outros transdutores de irradiância e temperatura de célula, instalados em um GFV de módulos de mesmo modelo (SW245), inclinação e orientação, em uma distância aproximada ao gerador do trabalho. As informações foram coletadas em um outro registro de dados e empregadas apenas para a simulação no MATLAB do SFB 1 e 2.

2.5.1 Transdutor de tensão

Para o barramento c.c. do GFV, empregou-se o transdutor da marca SECON (Figura 2.20), com suporte a tensões de até 500 V_{CC} na entrada, com uma faixa de saída entre 0-10 V_{CC}, dirigida ao *datalogger*. Ele é alimentado pela rede da concessionária em 127 V_{AC}.

Figura 2.20 – Transdutor de tensão SECON.



Fonte: Silva (2019).

2.5.2 Transdutores de corrente

Instrumento de medição de corrente HR 30 da fabricante Minipa (Figura 2.21) em formato de garra, a qual não é invasivo, com leituras de correntes 30 A de corrente alternada ou contínua, sendo utilizado o último caso. A saída do medidor é um sinal de tensão c.c. em uma relação de 100 mV/ 1 A. A alimentação do sensor é uma bateria de 9 V_{CC}.

Figura 2.21 – Garra de corrente HR 30.



Fonte: Silva (2019).

O segundo transdutor de corrente utilizado foi o HAS 50 S, da marca LEM (Figura 2.22). É um dispositivo com maior capacidade de leitura comparado ao Minipa HR 30, com medição de correntes alternada e contínua de até 50 A. A saída do equipamento é de $\pm 4 V_{CC}$. Como a corrente dos SFB pode chegar até 10 A, aproximadamente, o cabo do GFV foi enrolado duas vezes para aumentar a precisão da leitura. Esse transdutor de corrente mediu correntes apenas do SFB 1 e 2. Para o funcionamento do dispositivo, recorreu-se a uma fonte simétrica de $\pm 15 V_{CC}$.

Figura 2.22 – HAS 50 S.

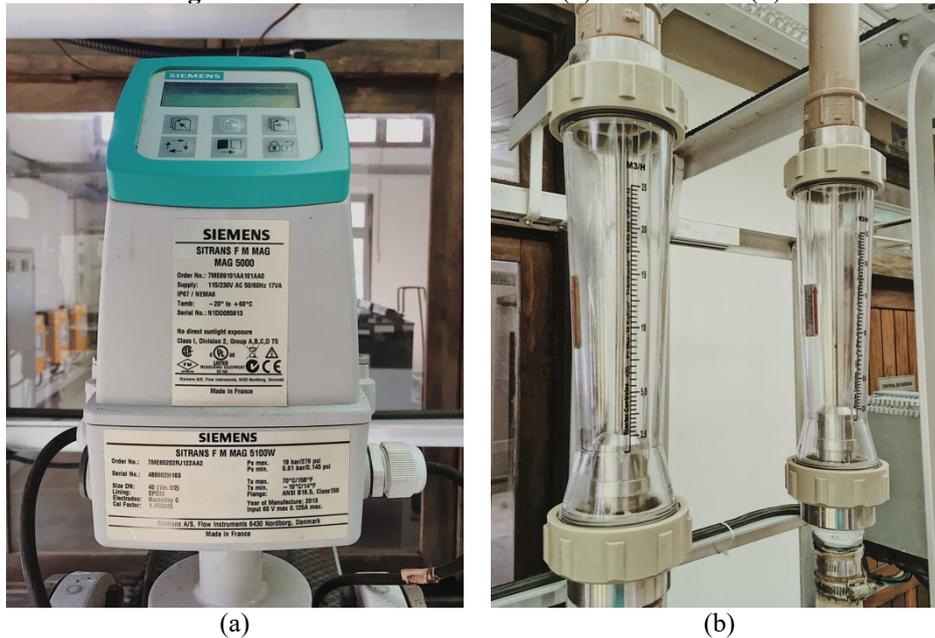


Fonte: LEM S.A. (2022).

2.5.3 Transdutor de vazão e rotômetros

A vazão do sistema é monitorada pelos medidores: transdutor de vazão e rotômetros. O primeiro é do modelo MAG 5000 da fabricante Sitrans (Figura 2.23a), e opera em uma tensão na faixa de 115-230 V_{AC} e frequência de 50/60 Hz. Ele é um equipamento invasivo, por onde a tubulação deve passar diretamente por ele. Ele possui um sinal de saída em forma de corrente (4-20 mA). Os rotômetros, identificados na Figura 2.23b, são medidores analógicos, em que flutuadores, localizados internamente, se movimentam a medida da alteração do nível de vazão do fluido. Utilizaram-se dois rotômetros para medir ambas as vazões das motobombas do projeto.

Figura 2.23 – Transdutor de vazão (a) e rotâmetros (b).



(a)

(b)

Fonte: Elaborado pelo autor.

2.5.4 Sensor para medição de temperatura

O termoresistor RTD Sensor T PT1000 B da fabricante SOL.Connect mede a variação da temperatura à medida da variação da resistência ôhmica do sensor, com atuação na faixa de -35°C a 135°C (Silva, 2019). Ele é acoplado na parte posterior do gerador (Figura 2.24), com a resistência registrada pelo *datalogger*. Foram empregados dois desses sensores, sendo que os dados coletados pelo primeiro foram utilizados para conduzir as simulações do MATLAB em relação ao GFV SW245. Os dados obtidos pelo segundo foram empregados nas simulações do GFV S55P, além de serem utilizados para a geração dos gráficos de irradiância, vazão e potência, mostrados posteriormente nos resultados.

Figura 2.24 – Termoresistor PT1000 B.



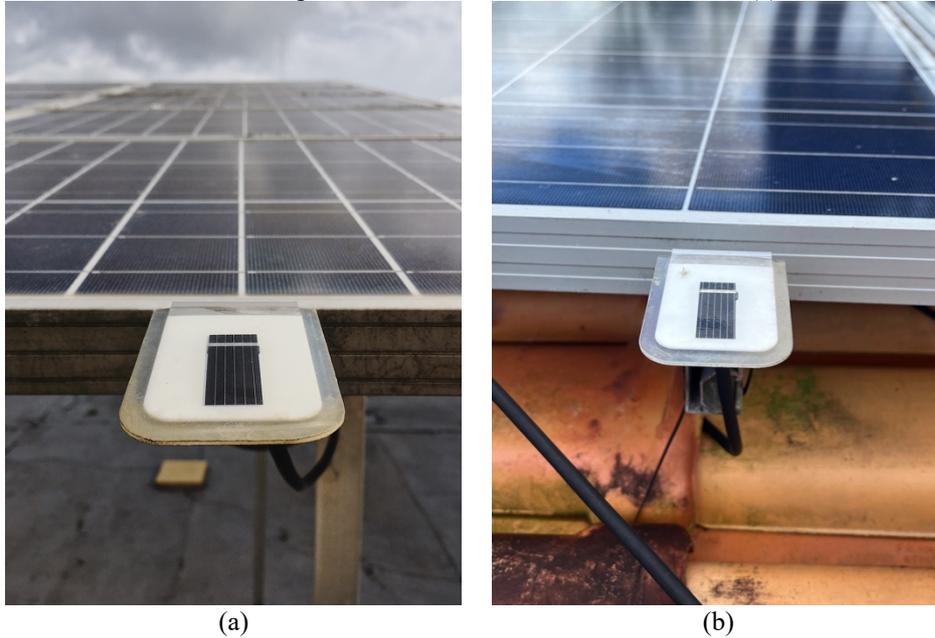
Fonte: Silva (2019).

2.5.5 Sensores de irradiância

Modelo Spektron 210, da fabricante Tritec (Figura 2.25a), é uma célula fotovoltaica de referência na faixa de $0\text{-}1,5\text{ kW/m}^2$. Para cada 1 kW/m^2 de irradiância a tensão de saída do equipamento será próxima de $73,8\text{ mV}$ (última calibração realizada em 2023). Instalou-se o

Spektron 210 ao lado do GFV S55P, com a mesma inclinação e orientação, para aumentar a confiabilidade dos dados. A segunda célula de referência, de mesmo modelo, com calibração de 71,7 mV para cada 1 kW/m² foi usufruída para o GFV SW245 (Figura 2.25b).

Figura 2.25 – Sensor de irradiância Spektron 210 atrelado aos módulos Solaris (a); aos módulos SW245 (b).

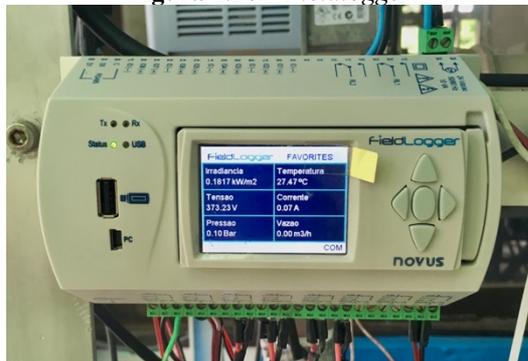


Fonte: Elaborado pelo autor.

2.5.6 Equipamento de registro de dados

As informações dos transdutores foram coletadas pelo *datalogger*. Para este trabalho, empregou-se o modelo *Fieldlogger* da fabricante Novus (Figura 2.26). Esse equipamento permite a alteração de intervalos de coleta, calibração de dados e outras funcionalidades (Novus Ltda., 2023). O dispositivo possui oito entradas analógicas, sendo seis atribuídas aos transdutores. Determinou-se o intervalo de coleta de dados a cada segundo e, posteriormente, integrados e salvos em minutos. O *Fieldlogger* possui suporte de entradas do tipo tensão, corrente e específico para o sensor de temperatura PT1000, com saída em resistência elétrica.

Figura 2.26 – *Fieldlogger*.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na interface do dispositivo há as algumas informações do registro, gráficos das variáveis e informações extras, como as especificações e a memória em uso (Figura 2.27). Quaisquer alterações de calibração ou inclusão de um novo sensor, são realizadas no programa do próprio sensor, disponibilizado no site da fabricante, com suporte apenas para sistemas Windows XP ou superior, por meio da conexão da entrada mini USB do equipamento (Novus Ltda., 2023).

Figura 2.27 – Programa do *Fieldlogger*.

The screenshot displays the 'Canais Analógicos' (Analog Channels) configuration window. It is divided into two main sections: 'Canais' (Channels) and 'Parâmetros' (Parameters).

Canais Section:

- Canal 1: Habilitado
- Canal 2: Habilitado
- Canal 3: Habilitado
- Canal 4: Habilitado
- Canal 5: Habilitado
- Canal 6: Habilitado
- Canal 7: Habilitado
- Canal 8: Habilitado

Intervalo de Varredura (Sweep Interval):

- Value: 2
- Options: x 1 ms, x 1 s

Parâmetros Section:

- Tag: CaldeiraTemp
- Valor de Erro: -100
- Tipo de Entrada: Termopar K
- Limites: Min. -130,0 Máx. 1372,0
- Unidade: °C, °F, °C
- Filtro Digital: 0 (Sem Filtro)
- Casas Decimais: 1
- Calibração Customizada: [Button]
- Pontos de Calibração Configurados: 0

Navigation Bar:

- Voltar (Back)
- Save icon
- Flag icon
- Help icon
- Refresh icon
- Close icon
- Seguinte (Next)

Fonte: Novus LTDA (2023).

2.5.7 Dispositivos de proteção

Os dispositivos de proteção ficam dentro do quadro de distribuição indicado na Figura 2.28. O quadro recebe energia elétrica da concessionária, que está conectada ao sistema de simulação de alturas manométricas, a um dos SFB e algumas fontes que alimentam os transdutores da bancada. O disjuntor geral trifásico protege o circuito elétrico ligado à rede da concessionária.

Figura 2.28 – Quadro de distribuição de energia com o disjuntor geral e a chave comutadora.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Há uma chave comutadora para a troca da fonte de energia que alimenta um dos DCP, o conversor de frequência CFW-11: a posição “0” indica desligado, a posição “1” o barramento c.c. será utilizado; e a posição “2” a rede da concessionária alimenta o CF. Como medida de segurança contra acidentes elétricos durante o manuseio do sistema, além de controlar a entrada de corrente dos geradores fotovoltaicos, seus cabos passam por um disjuntor diferencial residual, externo ao quadro de distribuição.

3 ANÁLISE E AVALIAÇÃO DA METODOLOGIA APLICADA E COMPARAÇÃO COM OS ENSAIOS PRÁTICOS

Este capítulo é dedicado a comparar os ensaios realizados nos três sistemas fotovoltaicos de bombeamento (SFB) com a simulação de aquisição do ponto máximo de eficiência solar (PMES) apresentada por Santos (2022) e Muñoz *et al.* (2015). Assim, acompanhou-se a operação dos SFB, em seis diferentes alturas manométricas (H), para a verificação do desempenho em cada H selecionado, do controle do seguidor do ponto de máxima potência (SPMP) do gerador fotovoltaico e da potência resultante (P_{FV}).

O propósito é verificar a confiabilidade da metodologia em calcular o desempenho do SFB em projetos inicialmente concebidos para operar em sistemas de bombeamento convencionais. Foi observado neste estudo que a transição para um sistema de energia diferente pode resultar em uma diminuição significativa na eficiência do SFB (η_s), devido à operação em níveis de frequência de rotação nominal mais baixos.

Portanto, a simulação surge como uma alternativa viável para os projetistas, que devem analisar se a eficiência do sistema é drasticamente afetada pela alteração do ponto de operação otimizado da bomba em relação à curva do sistema de tubulação do poço. É importante salientar que esta investigação se concentra em poços que possuem baixa variação do nível de rebaixamento, como os Amazonas.

No entanto, para o método adotado, o desconhecimento das curvas de eficiência da configuração típica de um SFB, e suas substituições por valores típicos, arriscam-se a reduzir a confiabilidade dos resultados, mas não os anulam, pois em caso da falta de informação prestada pelas fabricantes, ou mesmo por não possuir equipamentos para realizar a aquisição dessas curvas, os dados aproximados são extremamente úteis para a aproximação do ponto de operação otimizado.

Assim, realizaram-se diversos ensaios na bancada, com simulações de 20, 25, 30, 35, 40 e 45 metros de coluna d'água (mca), para observar os resultados dos SFB. Ressalta-se que os dados de irradiância (G) e temperatura de operação da célula (T_c) coletados para este estudo são provenientes apenas da célula de referência e PT1000 ligados ao gerador composto por módulos S55P da fabricante Solaris, por motivo da maior aproximação dos dispositivos ao *datalogger*, o qual centraliza a coleta dos dados da bancada de ensaios: irradiância, temperatura da célula, pressão, vazão (Q), corrente e tensão. Em vista disso, para o SFB 1 e 2, tais valores foram usados apenas como referência para as análises comentadas.

Por conseguinte, neste capítulo, aplicaram-se comparações entre os dados medidos (vazão, eficiência do sistema, potências do GFV e hidráulica), extraídos dos ensaios, com os resultados que seriam obtidos pela metodologia com as mesmas características impostas ao determinado teste do sistema (perfis de G e T_C).

3.1 Esquemático da metodologia

Com as informações dos sistemas fotovoltaicos de bombeamento, aplicou-se a metodologia na programação em MATLAB, dividida nas etapas mostradas no Capítulo 1. A começar pelas curvas H-Q e η -Q, extraídas das medições e exibidas na Figura 2.13, as quais por meio destas, as constantes das funções H(Q) e $\eta(Q)$ foram extraídas.

No total, o código abrangeu 25 pontos de pressão ($\mathbf{H} = \{H_1, \dots, H_j, \dots, H_m\}$), variando de 20 a 45 metros de coluna d'água (mca), com intervalos de 1 mca ($\mathbf{H} = \{20:1:45\}$). Mediante as informações obtidas e aproximadas das características da motobomba em operação na frequência nominal (f_N) nos nove pontos de H registrados na Tabela 2.6, foi possível calcular e estimar os valores para todos os 25 elementos da matriz \mathbf{H} a serem simulados no MATLAB.

Com isso, para a operação em $f_N = 60$ Hz, obteve-se a vazão (Q_f), a eficiência da bomba (η_B), e a potência requerida pelo motor (P_M). Os valores de Q_f foram derivados da curva H-Q. As eficiências da bomba foram extraídas da curva η -Q. A eficiência do motor, para esses cálculos, foi fixada em 70 % para todas as situações, pois como foi observado na Tabela 2.6, mesmo com diferentes níveis de fator de carga (LF), os valores de η_M permaneceram equivalentes ao nominal. Por intermédio da aplicação da Equação (1.18), determinou-se o P_M para cada altura manométrica simulada. Os resultados desses cálculos estão apresentados na Tabela 3.1 para as alturas de 20, 25, 30, 35, 40 e 45 mca ($\mathbf{H} = \{20:5:45\}$). Esses níveis de pressão foram utilizados nos ensaios dos SFB na bancada.

Tabela 3.1 – Características nominais da motobomba Leão 4R5-PA geradas por cálculos, por meio das informações obtidas.

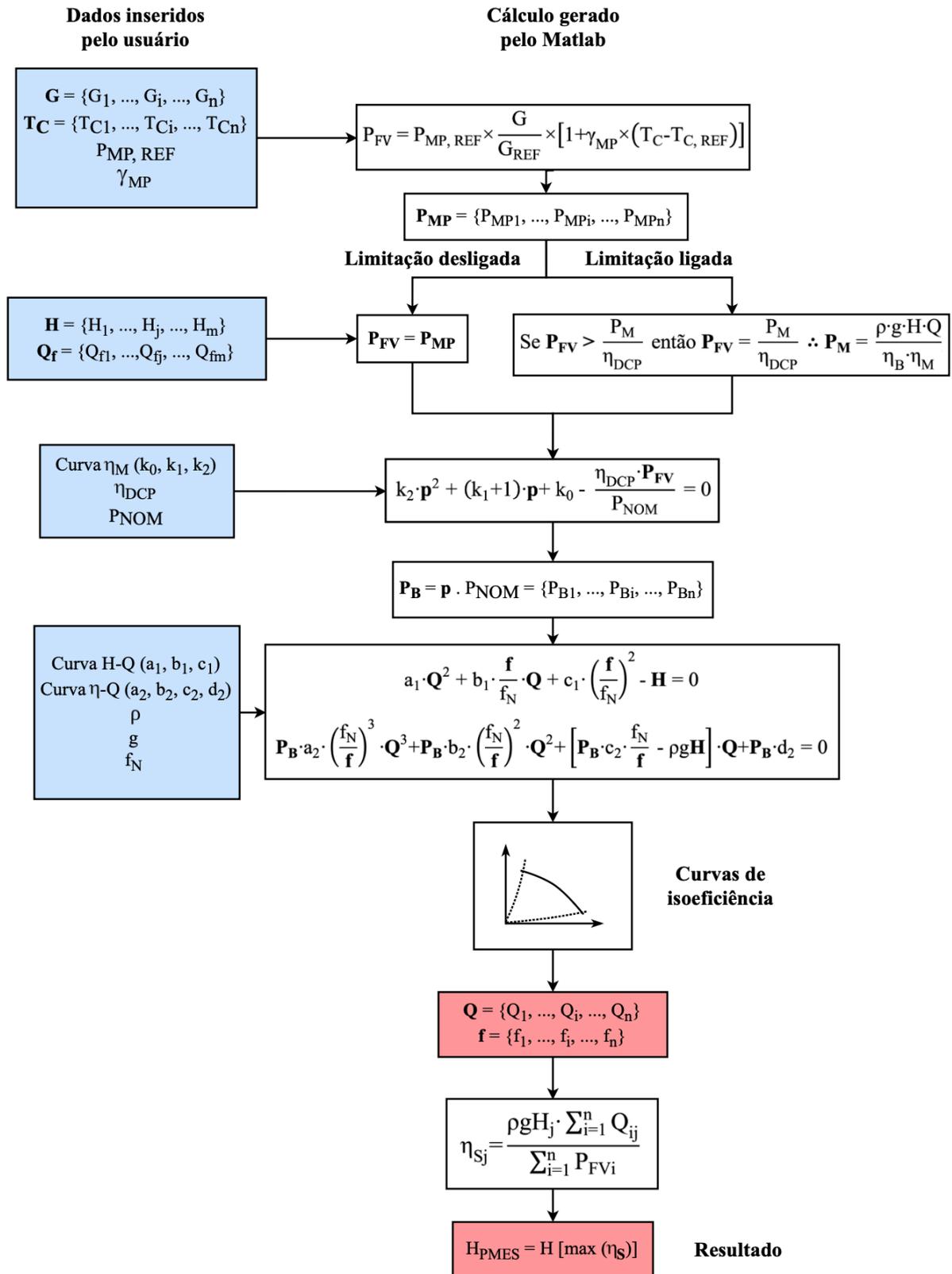
Motobomba Leão 4R5-PA – Dados extraídos da simulação						
Altura manométrica [mca]	20	25	30	35	40	45
Vazão [m³/h]	6,31	5,85	5,36	4,84	4,26	3,62
Eficiência da bomba [%]	40,1	47	52,7	56,9	59,1	58,7
Potência requerida pelo motor [W]	1219	1206	1184	1155	1118	1075

Fonte: Elaborado pelo autor.

Ao comparar tais dados com as informações medidas da bomba na Tabela 2.6, nota-se que há diferenças, porém próximas do esperado, o que propicia na confiabilidade da

programação da metodologia. A Figura 3.1 representa um fluxograma que resume os passos do programa e as inserções dos dados que foram providas para a realização deste trabalho.

Figura 3.1 – Fluxograma do código utilizado no MATLAB.



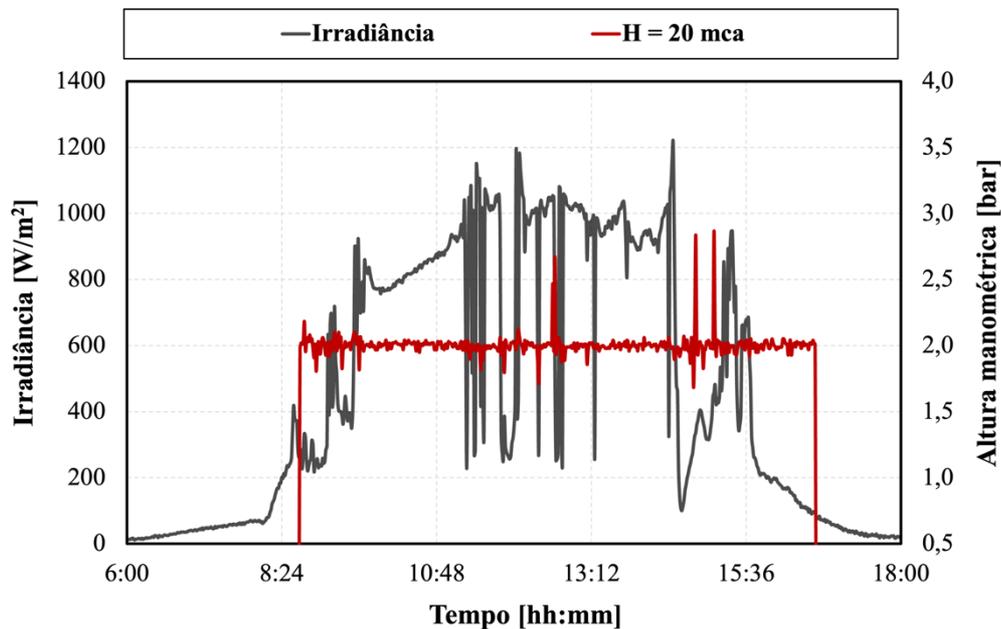
Fonte: Elaborado pelo autor do trabalho.

3.2 Rendimento do controle de pressão da bancada de ensaios

Primeiramente, deve ser demonstrado que a bancada de ensaios e seu sistema de controle proporcional integral derivativo (PID) são eficazes para a manutenção de uma pressão estável durante a operação da bomba Leão 4R5PA. Para isso, a motobomba Ebara 4BPS5 é mantida a uma frequência rotacional inferior à nominal de 60 Hz, na faixa de 50-52 Hz, com o intuito de evitar que os distúrbios no sistema interfiram nos testes em andamento, como uma redução súbita na velocidade da 4R5PA que, para manter a pressão no valor definido pelo usuário, há o aumento da rotação na Ebara.

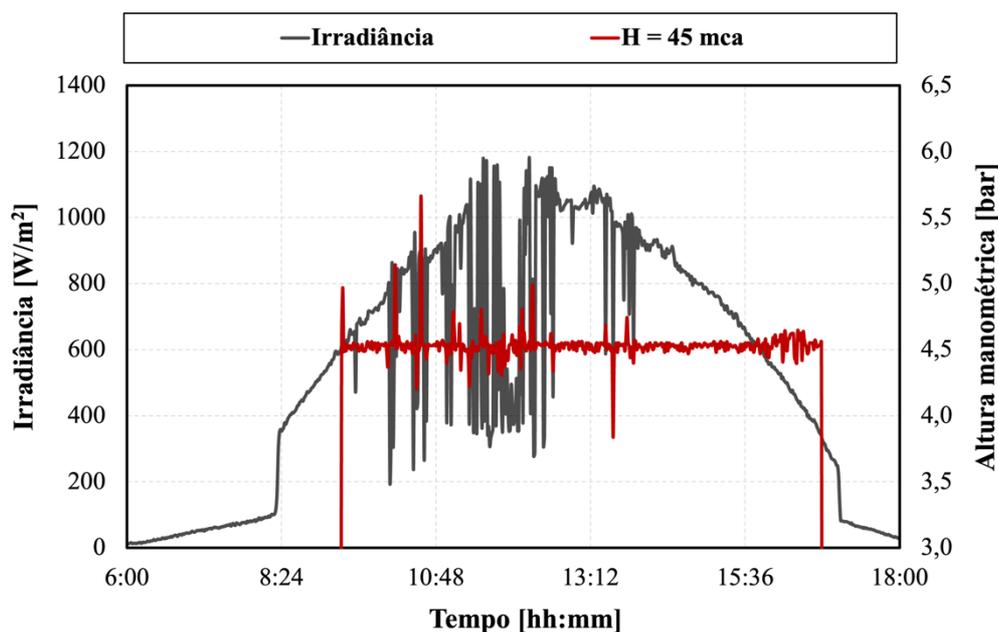
A Figura 3.2 e a Figura 3.3 apresentam gráficos do controle em diferentes alturas manométricas realizada pela bancada de ensaios, respectivamente para 20 e 45 mca, ambas sendo os limites de operação mínimo e máximo, respectivamente, da Leão 4R5PA, para os estudos tratados neste trabalho. Os gráficos provêm dos ensaios do SFB 1, por conta da maior potência do gerador fotovoltaico (GFV), a qual a motobomba desempenha em vazões mais dispersas.

Figura 3.2 – Gráfico da irradiância e pressão em 20 mca.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 3.3 – Gráfico da irradiância e pressão em 45 mca.



Fonte: Elaborada pelo autor.

A média de pressão dos gráficos foram de 20 mca e 45,3 mca, respectivamente. Percebe-se que o sistema de controle PID mantém estável a pressão quando os níveis de irradiância (G) possuem alterações mais suaves, porém, quando é acentuado, há picos, de até 143,5 % no caso de $H = 20$ mca, e 125,7 % em relação a $H = 45$ mca. No entanto, considerou-se ser casos pontuais e suas influências foram consideradas desprezíveis e pouco influenciaram no objetivo do trabalho.

3.3 Metodologia aplicada ao SFB 1

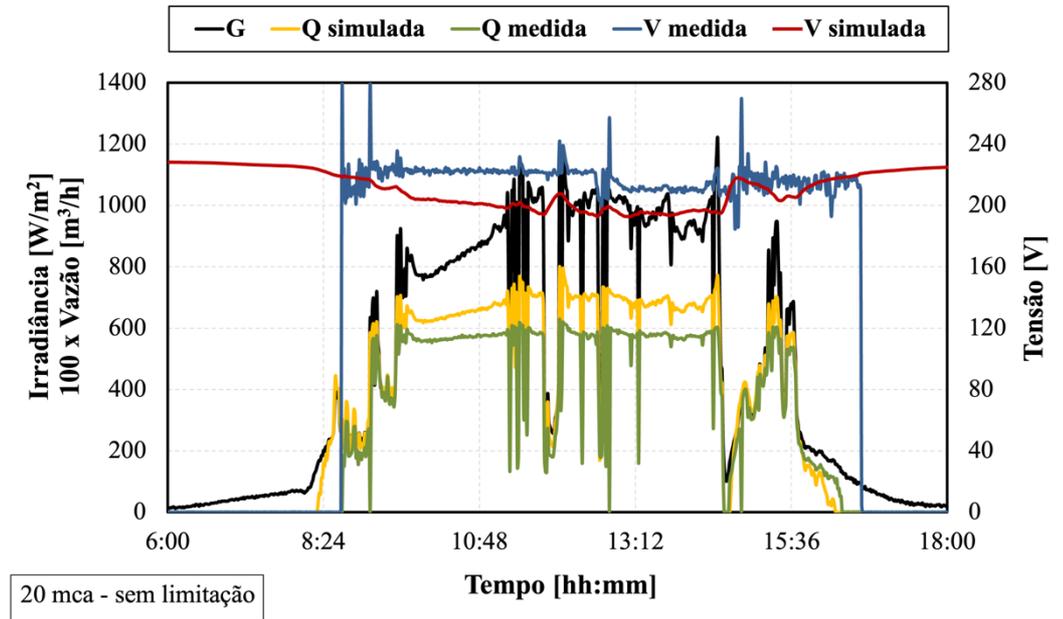
O primeiro sistema contou, inicialmente, com uma configuração do GFV com oito módulos SW245 (SolarWorld), com uma potência nominal de referência ($P_{MP, REF}$) de 1960 W_P , e medida em 1850 W_P , sendo esta última utilizada para o cálculo do P_{MP} . O dispositivo de condicionamento de potência (DCP) possuiu a configuração mais simples entre os três sistemas testados. Ao todo, foram realizados ensaios para $H = \{20:5:45\}$ com, no mínimo, cinco dias de operação em cada.

3.3.1 Comparação com a simulação do MATLAB

A Figura 3.4 e a Figura 3.5 retratam dois exemplos de dias ensaios em alturas manométricas de 20 e de 45 mca, respectivamente. Para os dados simulados nos gráficos, a potência do gerador fotovoltaico não foi restringida em função da vazão da bomba, sendo apenas considerada a eficiência de DCP de 97 % adotado para esse trabalho. Ao visualizar os

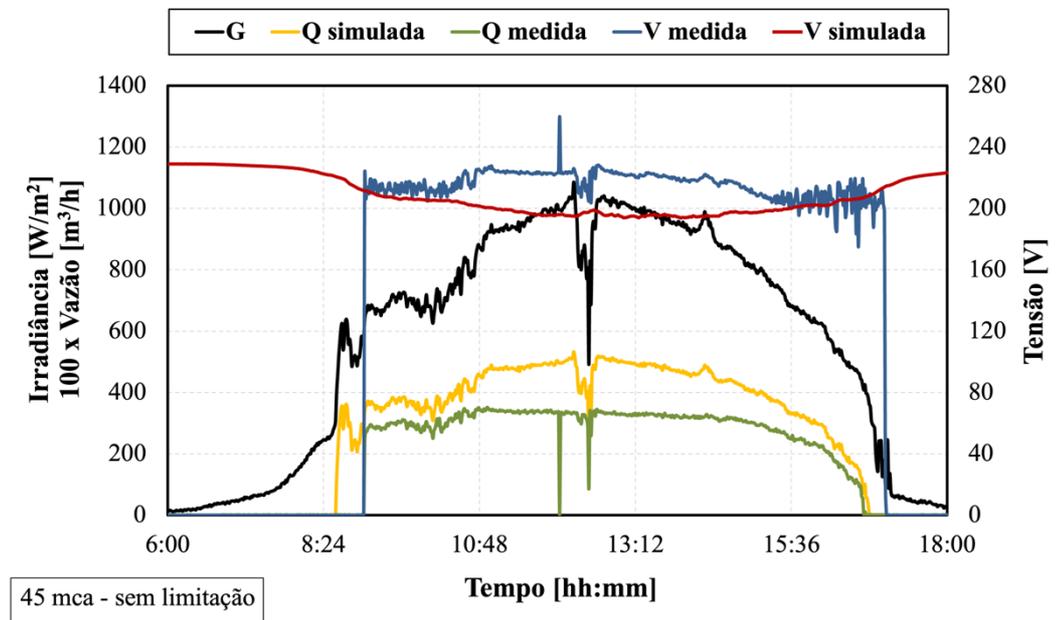
gráficos, percebe-se que a ausência da limitação na simulação acarretou o aumento demasiado de vazão, ultrapassando o valor previsto para a operação em frequência nominal (Q_f).

Figura 3.4 – Gráfico da irradiância, vazão e tensão medidas e simuladas do SFB 1 em 20 mca.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 3.5 – Gráfico da irradiância, vazão e tensão medidas e simuladas do SFB 1 45 mca.



Fonte: Elaborada pelo autor.

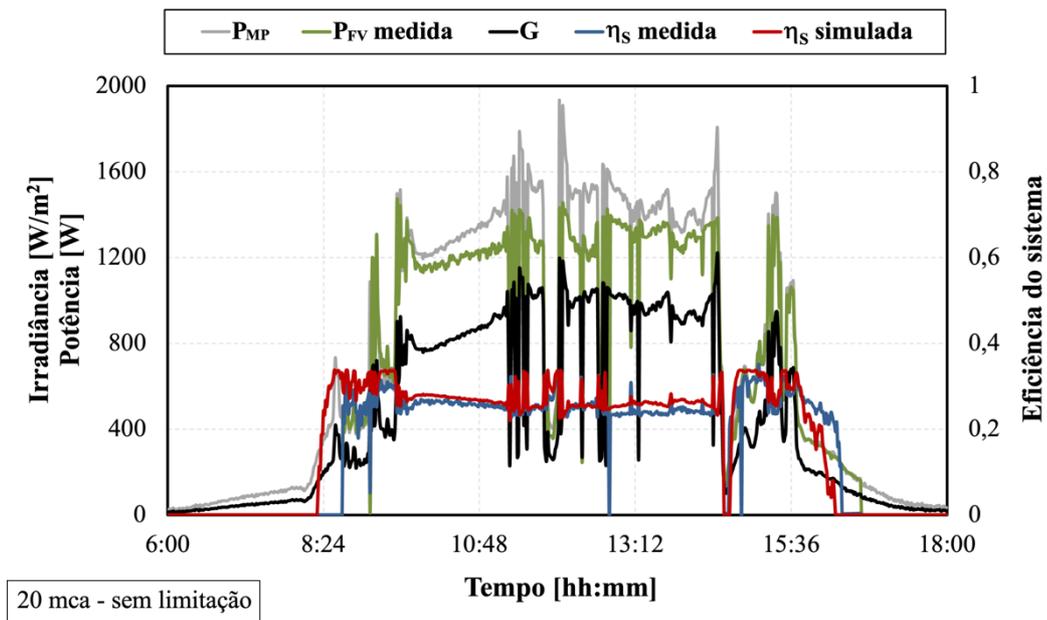
Em $H = 20$ mca, o SFB 1 foi ligado entre 9h07min até 16h43min, enquanto em 45 mca, teve início às 8h47min até 16h40min. Durante esses períodos, nos perfis medidos de vazão, os valores máximos atingidos, em ambas as alturas manométricas, estiveram levemente abaixo da

vazão em f_N , mesmo com uma potência de GFV suficiente para alcançar os valores na operação nominal ($6,25 \text{ m}^3/\text{h}$ para 20 mca e $3,6 \text{ m}^3/\text{h}$ para 45 mca).

Essa atenuação na vazão pode estar atrelada a uma baixa tensão do barramento c.c. (V_{CC}) para o controlador. Embora não esteja explicitado, ao considerar a aproximação com o modelo Intelbras DS 3220, é necessária uma tensão de barramento c.c. cerca de $286 V_{CC}$ para suprir a tensão de corrente alternada (V_{CA}) trifásica do motor. Contudo, ao visualizar os gráficos, o uso do GFV de oito módulos SW245 garantiu uma tensão entre $215\text{-}235 V_{CC}$. Nas situações apresentadas, quando houve um aumento na irradiância, próxima de $1000 \text{ W}/\text{m}^2$, o DCP mudou o ponto da curva I-V para valores mais altos de tensão, em contraste da diminuição das tensões de máxima potência simuladas.

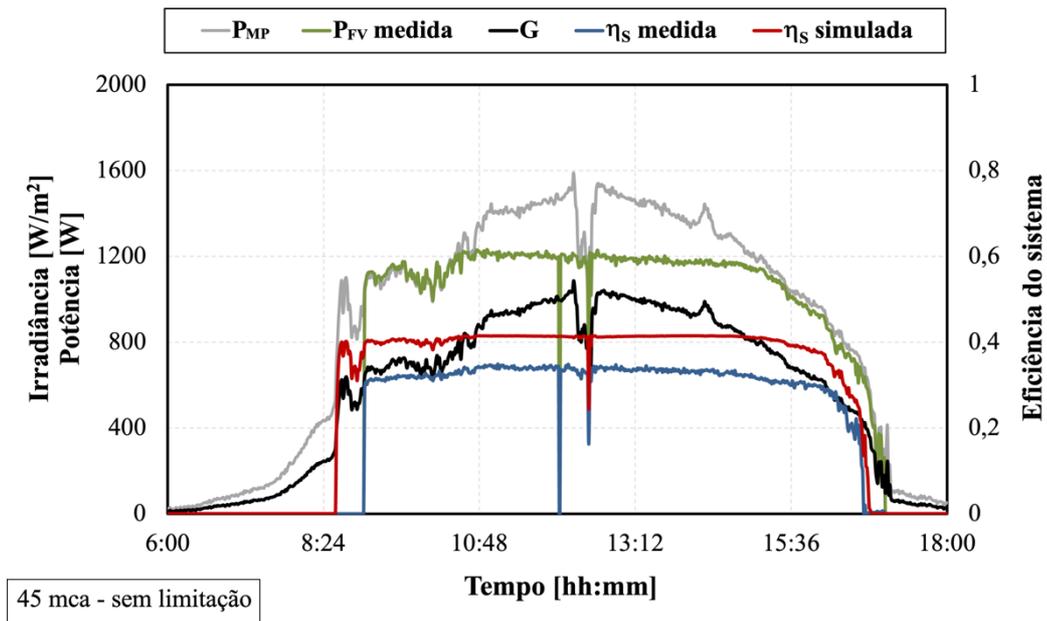
Na Figura 3.6 e Figura 3.7, que mostram a comparação das potências e eficiências do sistema (η_s), percebe-se a semelhança da medição no teste com P_{MP} até aproximadamente $800 \text{ W}/\text{m}^2$ de irradiância, atingindo eficiência do SPMP (η_{SPMP}) de $97,5 \%$. Há então um aumento na discrepância entre ambos os dados e a medição de P_{FV} ficou abaixo do teórico, com uma média de η_{SPMP} de 90% . As eficiências η_s estiveram mais equiparadas. Todavia, uma discrepância mais significativa foi observada no final do dia, onde a eficiência simulada diminuiu em comparação com a eficiência medida nos ensaios. Essa disparidade pode estar relacionada à distância entre o sensor (que está próximo ao GFV S55P) e ao GFV SW245, e o sombreamento que pode ocorrer com o pôr do Sol.

Figura 3.6 – Gráfico da irradiância, potências e eficiências medidas e simuladas do SFB 1 em 20 mca.



Fonte: Elaborada pelo autor.

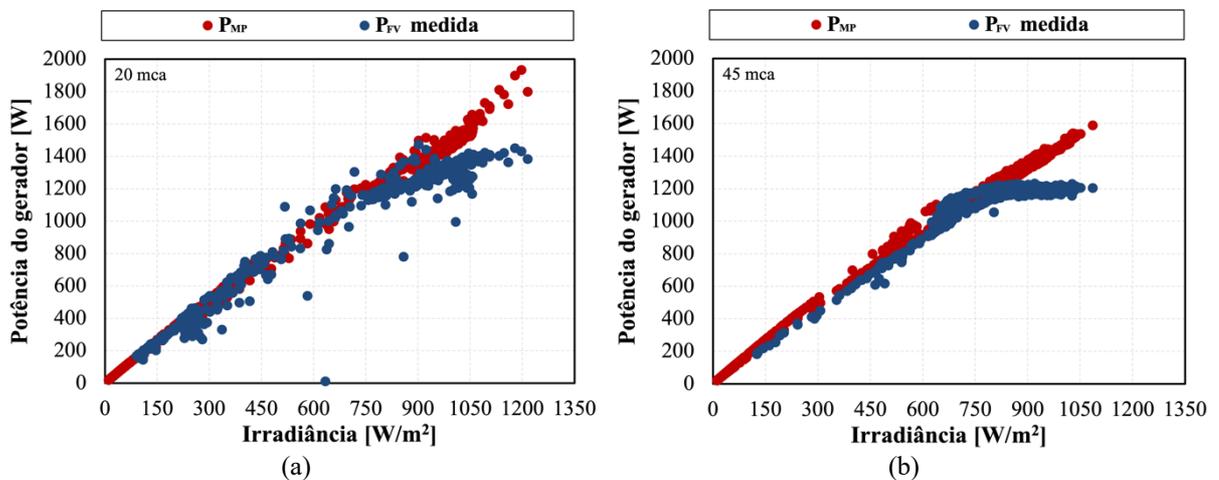
Figura 3.7 – Gráfico da irradiância, potências e eficiências medidas e simuladas do SFB 1 em 45 mca.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Para o ensaio de 45 mca, o SFB foi ligado entre 8h47min até 16h40min. Para esse caso, notou-se um comportamento parecido com o visto em 20 mca, com P_{FV} próxima a P_{MP} até 800 W/m^2 , atingindo 93,5 % de η_{SPMP} . A partir da irradiância de 800 W/m^2 , observou-se uma limitação de potência, com P_{FV} próxima a 1200 W, com η_{SPMP} de 82,3 % para esse intervalo. Em geral, a média da eficiência de SPMP ficou próxima a 90 %. A eficiência do sistema no ensaio de 45 mca se manteve inferior ao simulado. Por meio da Figura 3.8, cujo gráfico expressa a comparação das potências teóricas e medidas para as alturas manométricas de 20 e 45 mca, é evidenciada a limitação imposta no controlador IVS 100 pela bomba.

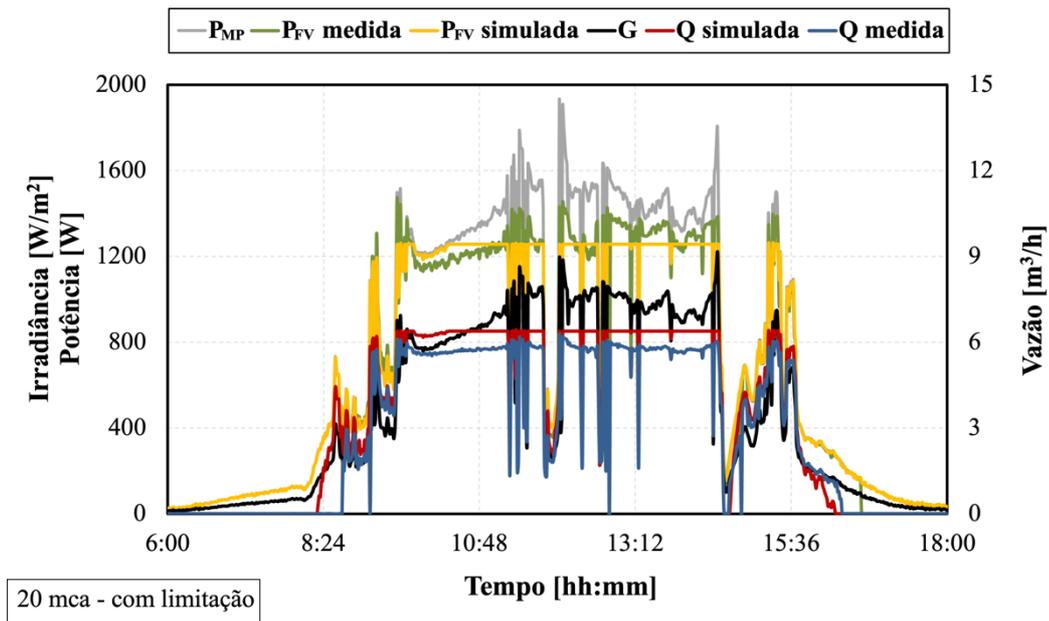
Figura 3.8 – Limitação de potência do controlador SFB 1 em 20 mca (a); 45 mca (b).



Fonte: Elaborado pelo autor.

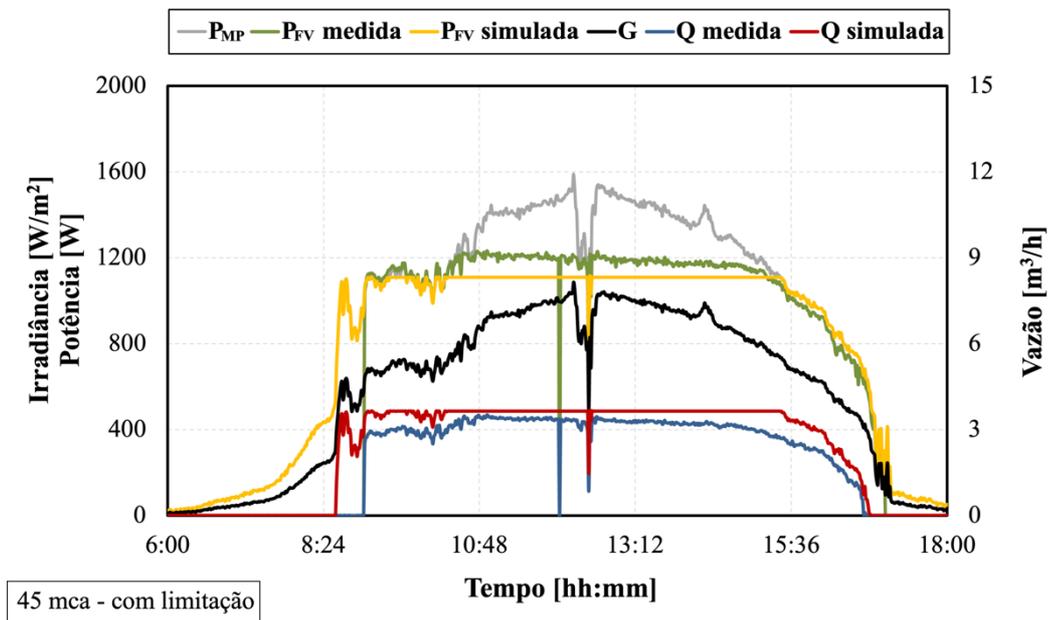
Conforme mencionado anteriormente, é improvável que o DCP forneça a potência teórica do gerador fotovoltaico, o P_{MP} , para a motobomba, especialmente em casos de sobredimensionamento. Dessa forma, baseado nas potências requeridas para o motor adquiridas no MATLAB, foi possível introduzir uma limitação de potência do gerador fotovoltaico no processo de cálculo, observada na Figura 3.9 e na Figura 3.10, baseada nas vazões nominais da motobomba para 60 Hz (ver Tabela 3.1).

Figura 3.9 – Gráfico da irradiância, potências e vazões medidas e simuladas do SFB 1, considerando a limitação de potência, em 20 mca.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 3.10 – Gráfico da irradiância, potências e vazões medidas e simuladas do SFB 1, considerando a limitação de potência, em 45 mca.

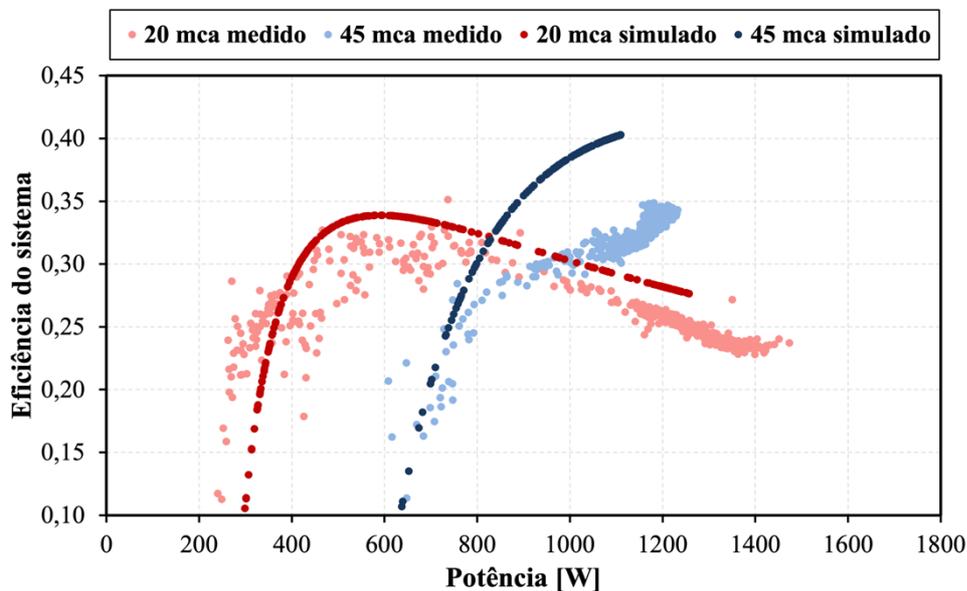


Fonte: Elaborada pelo autor.

Com a introdução da limitação de potência na programação, os perfis de vazão se aproximaram, porém ainda com disparidades, que podem ser associadas a tensão fornecida ao DCP. Adicionalmente, é possível inferir a existência de uma possível sobrecarga na motobomba, evidenciada pela disparidade entre as potências medidas e simuladas do GFV. Essa discrepância pode estar relacionada à atuação do controlador, onde a potência de bomba indicada para o DCP é três vezes superior à efetivamente utilizada (3 cv). Com a parametrização simples do equipamento, o fornecimento de informações detalhadas da atual bomba não pode ser configurado, pois o DCP é restringido a apenas algumas formas de controle de potência e proteção.

A Figura 3.11 ilustra a correspondência entre as curvas de eficiência calculadas e as medições obtidas por meio da metodologia programada no MATLAB. A partir dos gráficos, conclui-se que, em menor potência, a simulação se aproxima do que foi observado nos testes práticos, com início da operação próxima com as previsões. Para 20 mca, a simulação obteve um início de operação a partir de 298 W a partir do gerador fotovoltaico, mas constatou-se que a motobomba operou com cerca de 250 W. Para 45 mca, o valor real chegou muito próximo a expectativa, de 630 W. Percebe-se que a medida do aumento de P_{FV} , houve um aumento na diferença nas curvas η_s , principalmente para a altura manométrica mais elevada.

Figura 3.11 – Comparação das curvas de eficiência do SFB 1.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Importante reforçar novamente que as disparidades entre os valores simulados e medidos possivelmente estão relacionadas à tensão de operação da motobomba, impedindo que ela alcançasse vazões maiores devido a problemas de sobremodulação. Conforme explicado por Santos (2016), quando a tensão de operação no barramento de c.c. do controlador está a um

nível abaixo do recomendado, ocorre uma diminuição no fluxo do fluido, mesmo com níveis de potência aplicada a motobomba semelhantes. Isso ocorre porque o valor máximo eficaz da tensão de saída do DCP ($V_{CA, MAX}$) está diretamente relacionado à tensão do barramento c.c., como demonstrado na Equação (3.1).

$$V_{CA, MAX} = \frac{V_{B, CC}}{\sqrt{2}} \times 1,1 \quad (3.1)$$

Considerando a faixa de 215-235 V_{CC} na Figura 3.4, $V_{CA, MAX}$ estaria situado entre 167,7 e 183,3 V_{CA} , valores inferiores aos 230 V_{CA} necessários para o funcionamento adequado da motobomba.

3.3.2 Ensaio com o GFV de nove módulos

A fim de atingir um melhor desempenho do SFB, e reduzir o efeito de sobremodulação, optou-se por incluir um módulo SW245 a mais em série, totalizando uma *string* de nove módulos em série, com as especificações técnicas mostradas na Tabela 3.2. Embora a tensão de máxima potência (V_{MP}) esteja próximo a 257,6 V, a tensão de circuito aberto (V_{OC}) é de 329,2 V. Como o nível de potência do GFV já está elevado, presumiu-se que o DCP mantenha a tensão próxima a V_{OC} na curva I-V para limitar o gerador, como foi observado na Figura 3.5. Dessa forma, esperou-se atingir uma faixa mais ideal para suprir a demanda da motobomba. Realizou-se novas simulações, em 45 mca, com as especificações do GFV para observar o perfil de vazão da bomba.

Tabela 3.2 – Parâmetros elétricos do GFV SW245 considerando as perdas com o cabo.

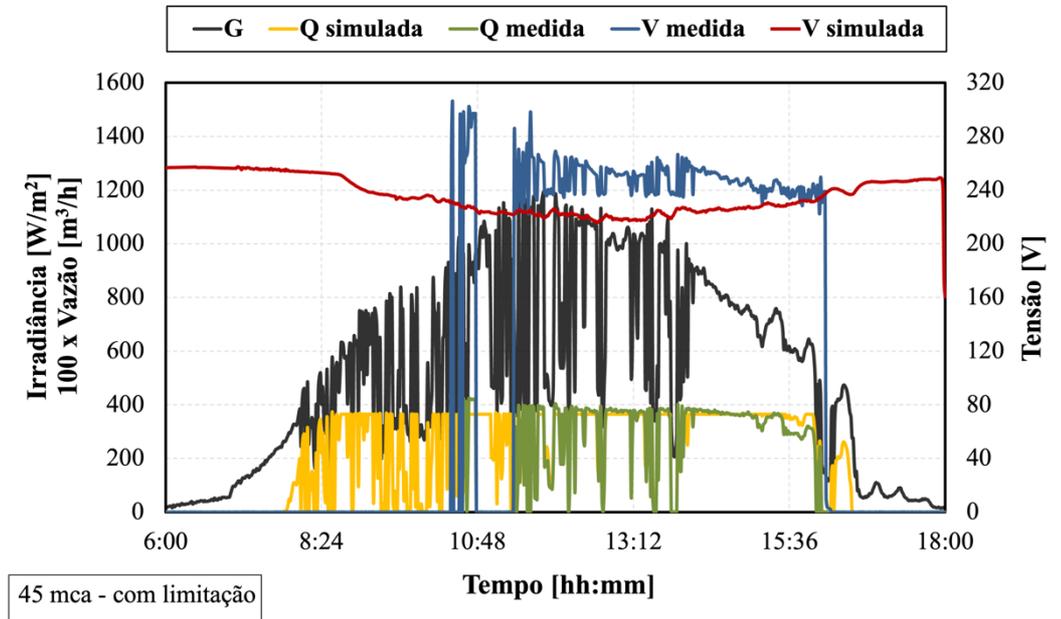
GFV SW245 – 9 módulos		
Parâmetros	1 módulo	9 módulos
Potência máxima nominal (P_{MP})	230,92 W _P	2078,3 W _P
Corrente de máxima potência (I_{MP})	8,07 A	8,07 A
Tensão de máxima potência (V_{MP})	28,62 V	257,6 V
Corrente de curto-circuito (I_{SC})	8,82 A	8,82 A
Tensão de circuito aberto (V_{OC})	36,58 V	329,2 V
Coefficiente variação de potência máxima (γ_{MP})		-0,48%/°C

Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 3.12 e Figura 3.13 ilustram a comparação de desempenho do SFB ao adicionar apenas um módulo, considerando a restrição de potência na simulação. Nesse caso específico, o sistema foi iniciado tardiamente, cerca de 10h20min, e houve uma queda de energia durante a manhã. Em relação à tensão do barramento c.c., houve um incremento para uma faixa de 240-280 V_{CC} , que resulta em 187,2-218,4 V_{CA} . Embora ainda com tensão menor que o necessário, foi o suficiente para demonstrar que o ajuste de tensão levou a motobomba a atuar em níveis de vazão maiores que a simulação previa. Nos testes realizados, a vazão do SFB 1 facilmente

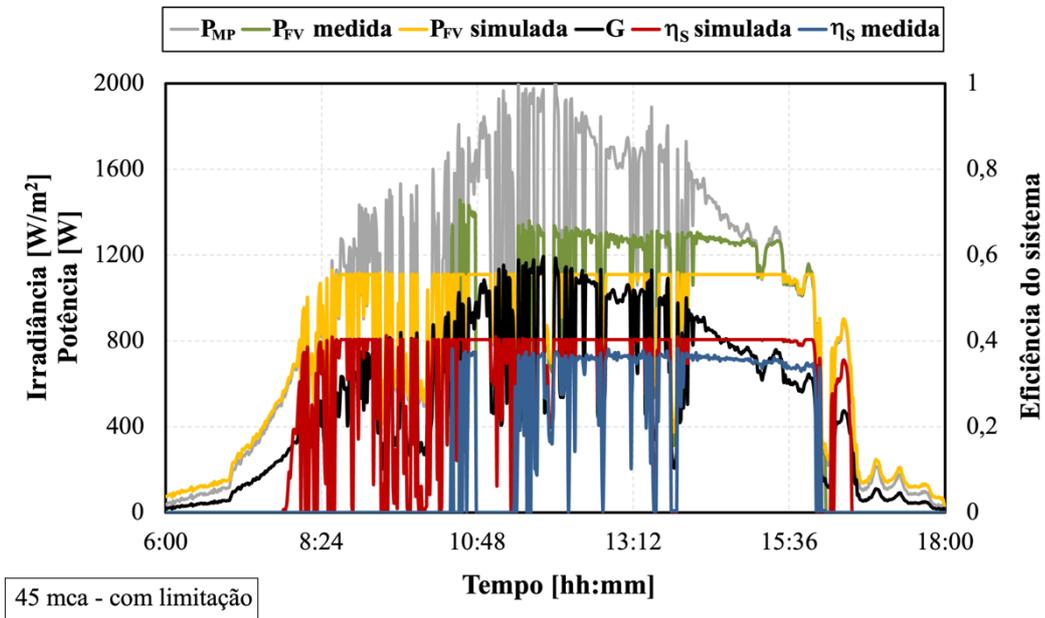
ultrapassou $4 \text{ m}^3/\text{h}$ em pontos diversos e para comparação, em $H = 45 \text{ mca}$, a vazão em frequência nominal (Q_f) é próxima a $3,62 \text{ m}^3/\text{h}$.

Figura 3.12 – Comparação das vazões e tensões do SFB 1 com a adição da limitação.



Fonte: Elaborada pelo autor.

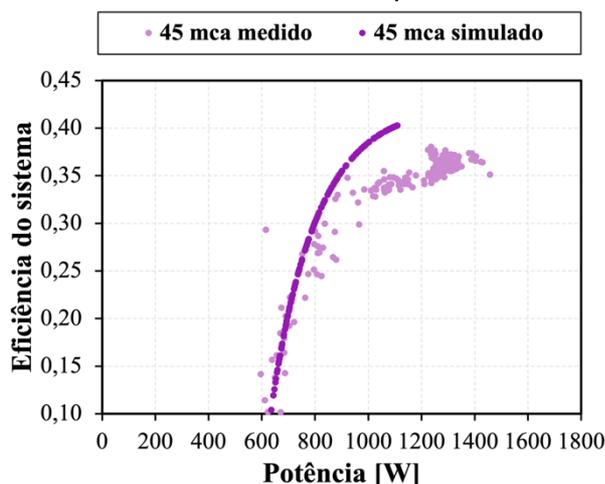
Figura 3.13 – Comparação das potências e eficiências do SFB 1 com a adição da limitação.



Fonte: Elaborada pelo autor.

A potência do GFV medida do gráfico, Figura 3.13, ainda permaneceu acima do calculado para a altura manométrica, baseado na potência requerida pelo motor, e que resultou ainda na diferença de eficiência do sistema. No entanto, a diferença foi menor em comparação ao uso com 8 módulos (Figura 3.14).

Figura 3.14 – Curva de eficiência do SFB 1 para 45 mca com 9 módulos.



Fonte: Elaborado pelo autor.

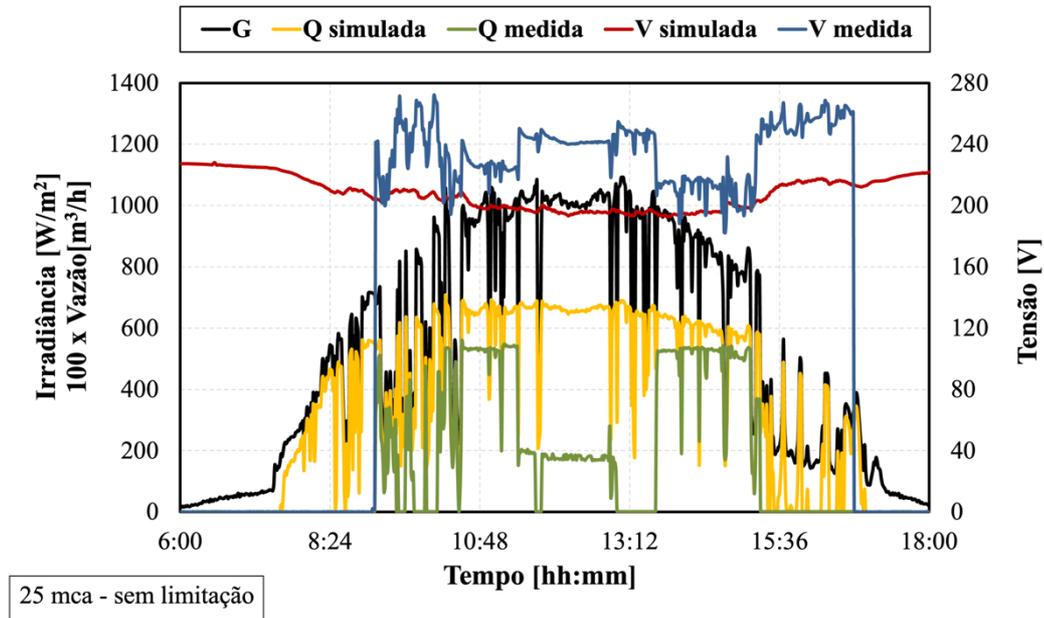
Por operar com tensões ainda abaixo do estipulado para o DCP, é possível que a motobomba ainda estivesse com restrição na vazão por causa da sobremodulação. Entretanto, salienta-se que o DCP possui medidas brandas de segurança, e é compatível com modelos de até 3 cv. Não há uma opção disponível para configurar especificamente os parâmetros da motobomba na sua interface. Como o arranjo fotovoltaico (FV) anterior já proporcionava níveis elevados de potência, concluiu-se que a adição de mais um módulo (totalizando dez módulos em série) poderia acarretar problemas no produto.

3.4 Metodologia aplicada ao SFB 2

O segundo sistema fotovoltaico de bombeamento utilizou o mesmo GFV SW245 e motobomba que o primeiro. A diferença crucial estava no dispositivo de condicionamento de potência, onde foi implementado o Intelbras DS 3220, um controlador que oferece uma gama mais ampla de opções de ajustes pelo usuário. As parametrizações foram realizadas em conformidade com as configurações iniciais orientadas no manual de instruções e com as restrições necessárias para o bombeamento com o uso da energia fotovoltaica. Configuraram-se as especificações da motobomba, o modo de controle de tensão do gerador fotovoltaico (SPMP), entre outros.

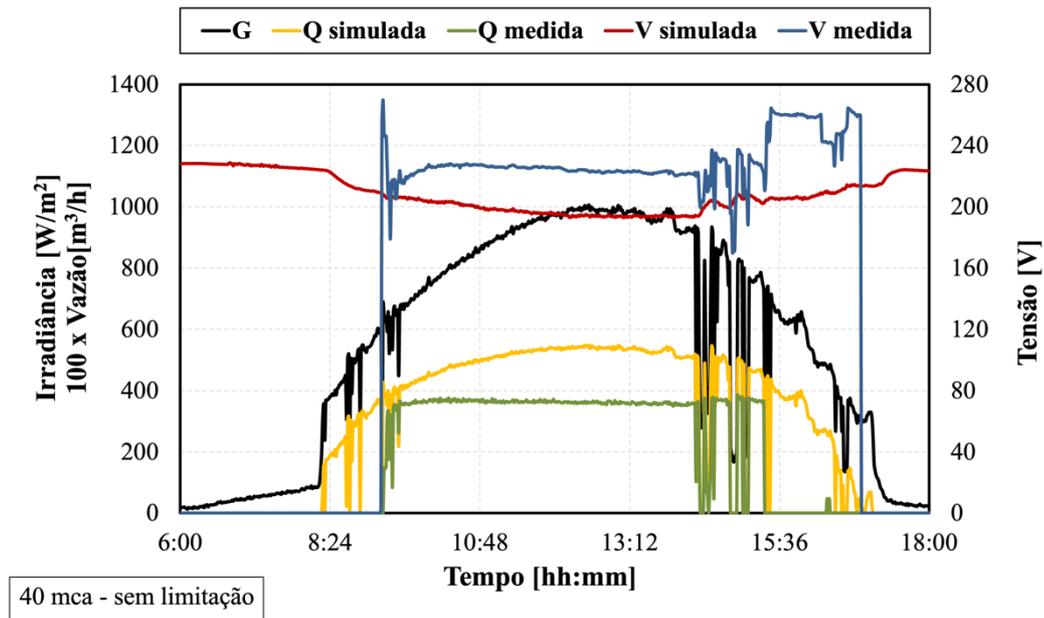
A expectativa era de um controle de potência mais eficiente, visto que havia melhores opções de ajustes na caracterização da motobomba. Com o uso do GFV de 8 módulos SW245 – de potência máxima nominal de 1850 W_p – e sem o uso de restrição de potência, a Figura 3.15 e a Figura 3.16 exibem dois exemplos de ensaios para 25 e 40 metros de coluna d'água, respectivamente.

Figura 3.15 – Comparação da vazão e tensão medidas e simuladas do SFB 2 em 25 mca.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 3.16 – Comparação da vazão e tensão medidas e simuladas do SFB 2 em 40 mca.



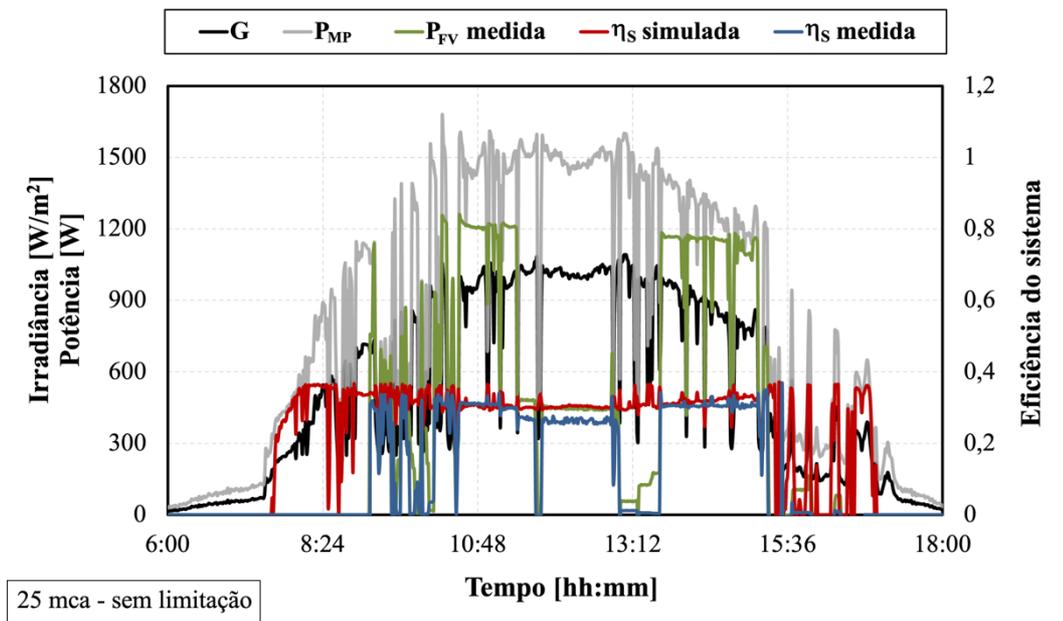
Fonte: Elaborada pelo autor.

Em geral, o perfil de tensão assemelhou-se ao do primeiro sistema, mas em uma faixa mais ampla, variando entre 180 e 270 V_{CC} (140,4 e 210,6 V_{CA} de valor máximo eficaz da tensão de saída do DCP), aproximadamente. Neste sistema, observaram-se problemas no controlador para manter o ponto da curva I-V mais ideal para o nível de irradiância, resultando em flutuações de desempenho da motobomba. Em vários momentos, o perfil de vazão do SFB desviou consideravelmente do esperado, conforme demonstrado nos gráficos.

No teste a 25 mca, a vazão sofreu uma drástica redução durante um período pico de irradiância, que ficou em torno de 1000 W/m^2 . Já em 40 metros, a vazão da bomba chegou a ser nula, a partir das 15h30min, após um curto período de intermitências na irradiância incidente. Durante esse período, devido a quedas abruptas na irradiância, o DCP restringiu a potência a níveis baixos, que só foram restabelecidos após uma intervenção manual no controlador. Além disso, observou-se uma diminuição do desempenho geral da vazão da motobomba, uma provável consequência da utilização de 8 módulos do SW245, com tensão de barramento c.c. abaixo do recomendado pela fabricante de $286 \text{ V}_{\text{CC}}$ (Intelbras S.A., 2022).

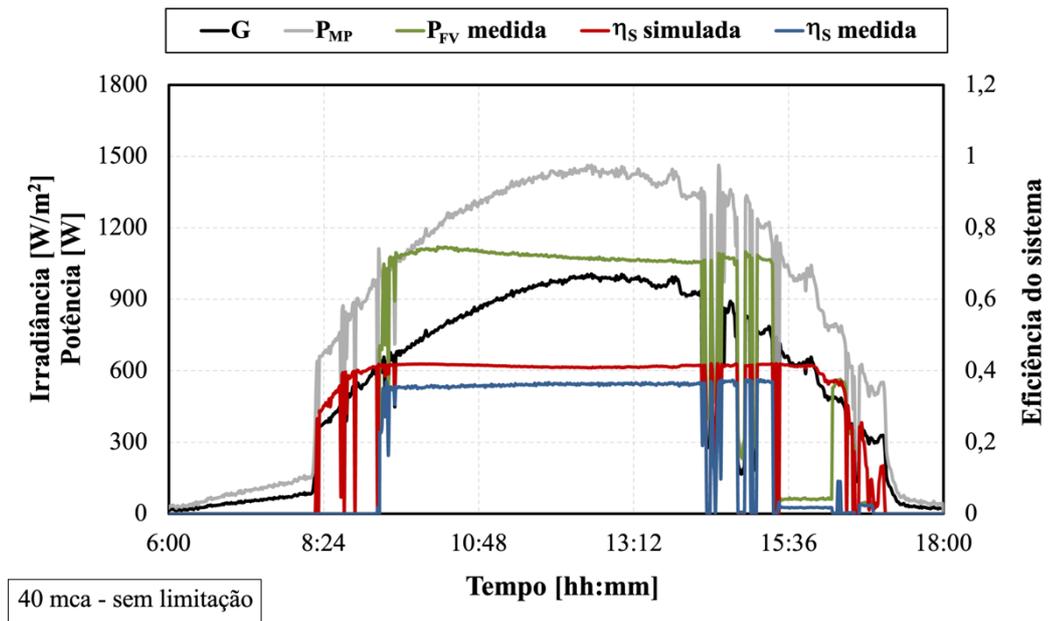
A Figura 3.17 e a Figura 3.18 apresentam a comparação dos perfis de potência e eficiência do sistema. A 25 metros, as eficiências do sistema se comportaram de maneira semelhante durante os picos de potência, e o DCP limitou a potência do GFV numa faixa próxima a 1200 W . Em 40 mca, P_{FV} permaneceu relativamente constante, com uma média de cerca de 1075 W , até próximo de 15h30min, momento que a potência ficou abaixo de 100 W .

Figura 3.17 – Comparação da potência e eficiência do sistema medidas e simuladas do SFB 2 em 25 mca.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 3.18 – Comparação da potência e eficiência do sistema medidas e simuladas do SFB 2 em 40 mca.



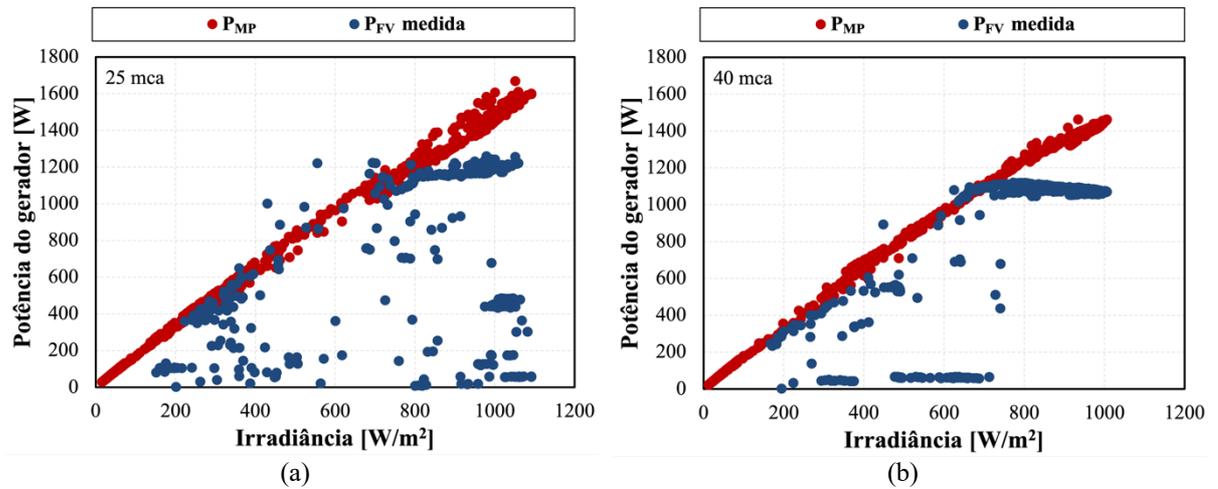
Fonte: Elaborada pelo autor.

Como mencionado anteriormente, o DS 3220 oferece uma ampla variedade de ajustes em comparação com o IVS 100, incluindo a capacidade de parametrizar a potência específica da motobomba. Isso pode ser a causa da maior restrição de potência em comparação ao primeiro sistema, e que acarretou a maior aproximação dos perfis de η_s com a simulação.

Em um sistema FV sujeito ao sombreamento, há o potencial de deslocar o ponto de operação do DCP ao longo da curva I-V do GFV, permanecendo em uma faixa de máximo local, que pode ser de potência significativamente inferior. Este fenômeno é relevante, uma vez que pode gerar complicações para o gerador quando o controlador se depara com transições abruptas na radiação solar e permanece nessas condições. Portanto, era plausível considerar que algum fator estivesse causando sombreamento no GFV, o que poderia ter limitado o desempenho do controlador no SPMP.

Todavia, não foram identificados obstáculos que pudessem impedir a incidência da irradiância no GFV. Além disso, observou-se limitações semelhantes em todas as medições realizadas no estudo desse sistema. Logo, é possível inferir que a causa deste problema pode estar relacionada a uma configuração incorreta no SPMP do DCP ou até mesmo no próprio equipamento. A Figura 3.19 apresenta as restrições observadas nos ensaios discutidos. Mesmo após ajustes na parametrização para aumentar o ganho no SPMP, o DCP continuou a se comportar de maneira similar.

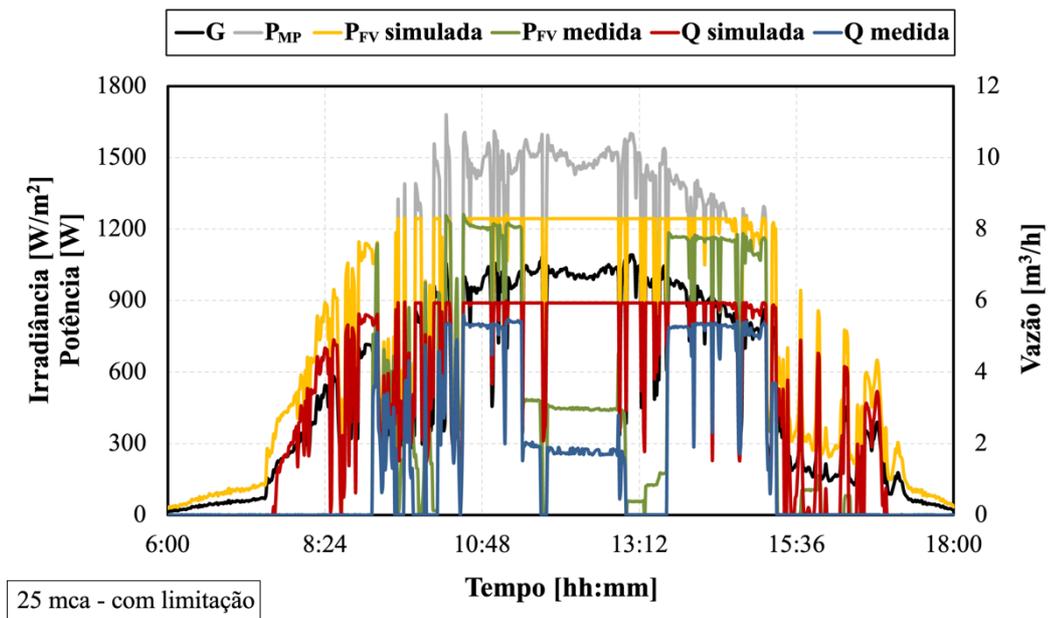
Figura 3.19 – Limitação de potência do controlador SFB 2 em 25 mca (a); 40 mca (b)



Fonte: Elaborado pelo autor.

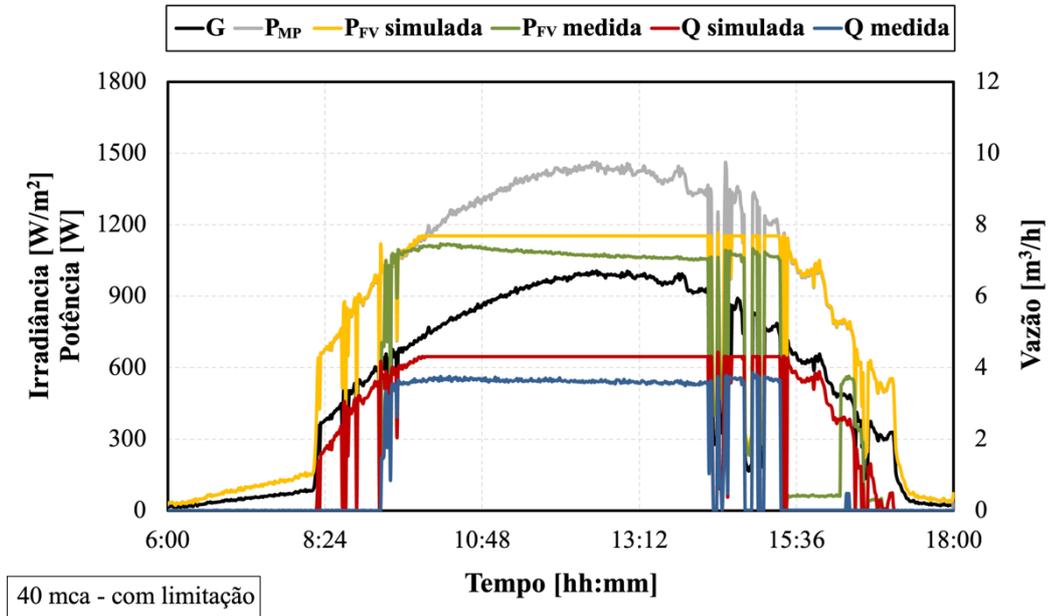
Ao incorporar a restrição de potência imposta pelo controlador em função da motobomba na simulação (ver Figura 3.20 e Figura 3.21), observa-se uma maior conformidade com o observado no ensaio. Ao contrário do SFB 1, a potência do gerador fotovoltaico permaneceu em níveis inferiores aos previstos. No que diz respeito à vazão, desconsiderando as situações de queda devido a problemas com o seguidor do ponto de máxima potência, nota-se que a diferença entre as medições e as simulações está em uma proporção semelhante ao visto nos perfis de potência, sugerindo uma maior concordância nas eficiências do sistema.

Figura 3.20 – Comparação das potências e vazões medidas e simuladas do SFB 2, considerando a limitação de potência, em 25 mca.



Fonte: Elaborada pelo autor.

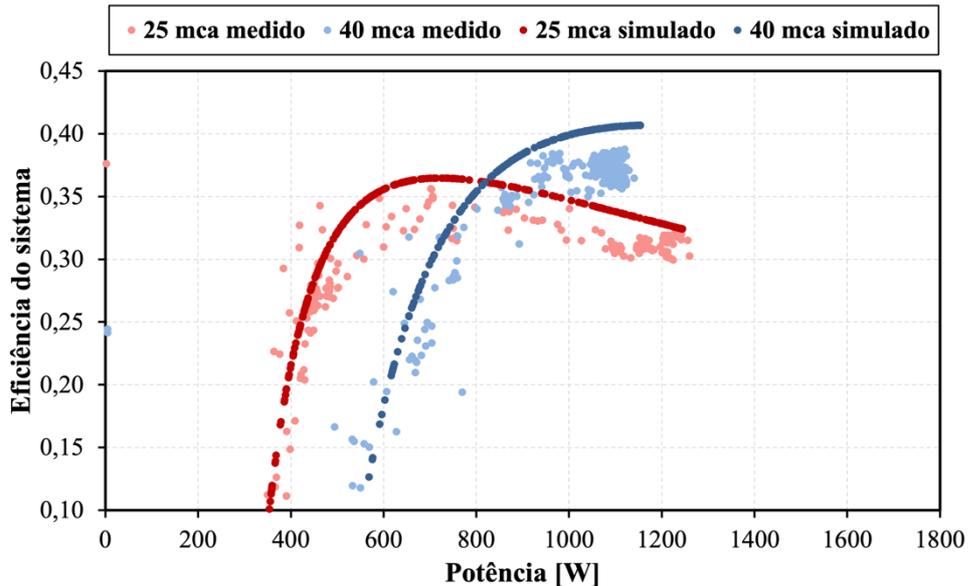
Figura 3.21 – Comparação das potências e vazões medidas e simuladas do SFB 2, considerando a limitação de potência, em 40 mca.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Na Figura 3.22, as curvas de η_s estão mais alinhadas com as expectativas da metodologia. Nota-se que os níveis máximos de potência fornecidos pelo controlador à motobomba estão mais próximos do observado nos cálculos. Devido à disponibilidade de uma interface de usuário com maior variedade de parametrizações, foi possível estabelecer a potência nominal (1 cv), permitindo que o DCP otimizasse a entrega de P_M .

Figura 3.22 – Comparação das curvas de eficiência do SFB 2.



Fonte: Elaborada pelo autor.

3.4.1 Ensaio com o GFV de dez módulos

Por ter um maior controle na potência entregue para a motobomba, optou-se por incluir dois módulos SW245 com o objetivo de melhorar a tensão de entrada do DCP, totalizando 10 módulos, conforme especificado na Tabela 3.3. Os ensaios foram conduzidos a 40 metros de coluna d'água para analisar o desempenho do sistema com essa inclusão. Como resultado, a tensão de ponto de máxima potência V_{MP} ficou próxima à necessária, registrando 286,2 V, e V_{OC} com 365,8 V. A potência máxima nominal aumentou em 25%, com 2309,2 W_P .

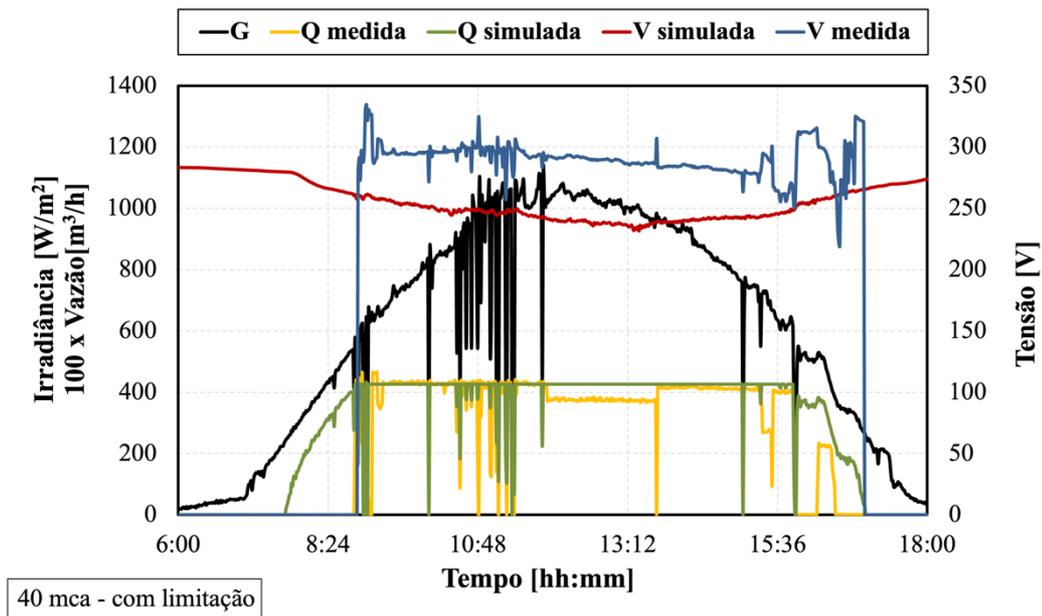
Tabela 3.3 – Parâmetros elétricos do GFV SW245 considerando as perdas com o cabo.

GFV SW245 – 10 módulos		
Parâmetros	1 módulo	10 módulos
Potência máxima nominal (P_{MP})	230,92 W_P	2309,2 W_P
Corrente de máxima potência (I_{MP})	8,07 A	8,07 A
Tensão de máxima potência (V_{MP})	28,62 V	286,2 V
Corrente de curto-circuito (I_{SC})	8,82 A	8,82 A
Tensão de circuito aberto (V_{OC})	36,58 V	365,8 V
Coefficiente variação de potência máxima (γ_{MP})	-0,48%/°C	

Fonte: Elaborado pelo autor.

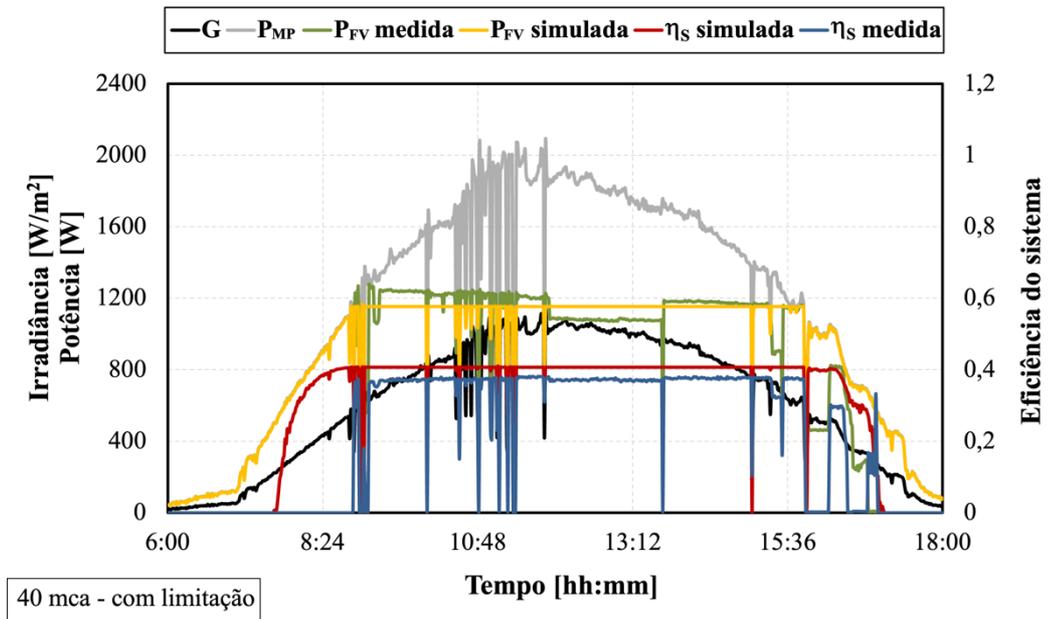
A análise da Figura 3.23 e da Figura 3.24 revelou uma melhor correspondência entre a vazão medida no teste e a vazão prevista. Durante esse período de avaliação, o sistema foi ativado por volta das 8h52min e desligado às 17h06min, momento em que a obtenção de vazão cessou. A tensão permaneceu em uma faixa próxima do desejado, variando entre 250 e 325 V_{CC} . Com a limitação de potência imposta tanto pela motobomba quanto pelas configurações do próprio controlador, a potência também se manteve um pouco acima do esperado.

Figura 3.23 – Comparação das vazões e tensões do SFB 2 para 40 mca com a adição da limitação.



Fonte: Elaborada pelo autor.

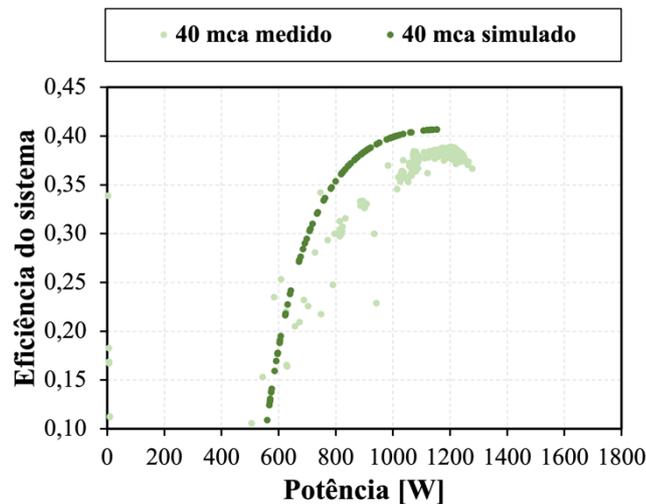
Figura 3.24 – Comparação das potências e eficiências do SFB 2 para 40 mca, com a adição da limitação.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Contudo, devido às questões relacionadas ao SPMP desse controlador, persistiram dificuldades em manter o sistema em uma faixa adequada de potência durante os períodos de alta irradiância. Inicialmente, nota-se que o SPMP consegue responder de maneira apropriada, mesmo diante de consideráveis flutuações na irradiância. Entretanto, em outras ocasiões, o ponto de operação na curva I-V não se encontrava devidamente otimizado. A comparação representada na Figura 3.25 evidencia as similaridades nas curvas de eficiência do sistema (η_S), mantendo-se próximas inicialmente. Contudo, à medida que a potência fornecida pelo gerador fotovoltaico (P_{FV}) aumenta, observa-se uma disparidade entre os valores medidos e simulados.

Figura 3.25 – Comparação das eficiências e potências medidas e simuladas do SFB 2.



Fonte: Elaborado pelo autor.

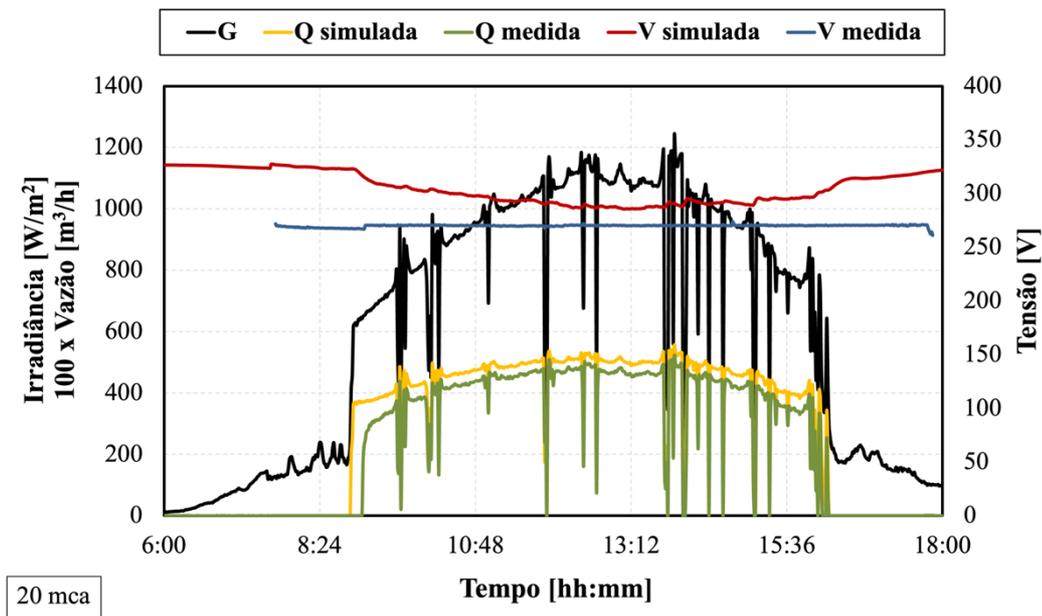
É possível apontar a falta de informações concretas das curvas dos componentes do SFB para a metodologia ou, ao menos, seus valores nominais (para 100 % de carga), como uma das causas para as discrepâncias entre a simulação e o obtido. Além disso, os imprevistos observados no controle da potência do gerador fotovoltaico com o uso do SPMP impactam nos cálculos teóricos realizados no MATLAB, conforme observado no SFB 1 e 2, os quais resultaram em diferentes níveis de potência entregues à bomba.

3.5 Metodologia aplicada ao SFB 3

O terceiro sistema testado empregou um gerador de menor potência, e com o conversor de frequência CFW-11. Os dados utilizados foram relativos a 2019, com uma potência máxima medida de 970 W_P em comparação aos 990 W_P nominais (Silva, 2019). Para atender à exigência de tensão de alimentação do CFW-11, é necessário um valor de tensão do barramento c.c. próximo a 282 V_{CC} .

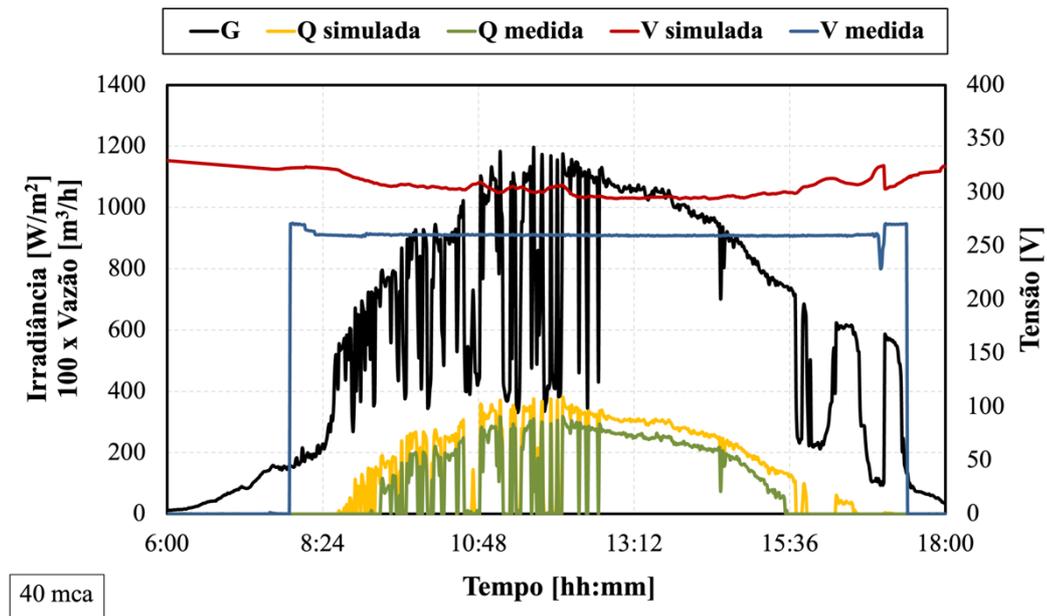
Na Figura 3.26 e Figura 3.27 são apresentados os resultados da vazão, tanto medida quanto simulada, para as alturas manométricas de 20 e 40 mca. Respectivamente, os ensaios foram configurados para uma tensão fixa de 270 V e 260 V. Levando em consideração $V_{CA, MAX}$, o nível de tensão se situa aproximadamente entre 202,8 e 210,6 V_{CA} , o que sugere problemas de sobremodulação que também podem impactar o desempenho do SFB. Para $H = 20$ mca, observa-se que o início da vazão simulada precedeu o registrado no ensaio. Isso pode ser atribuído ao sombreamento ainda presente no GFV, o qual pode não ter sido detectado pela célula de referência.

Figura 3.26 – Comparação das vazões e tensões do SFB 3 em 20 mca.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 3.27 – Comparação das vazões e tensões do SFB 3 em 40 mca.



Fonte: Elaborada pelo autor.

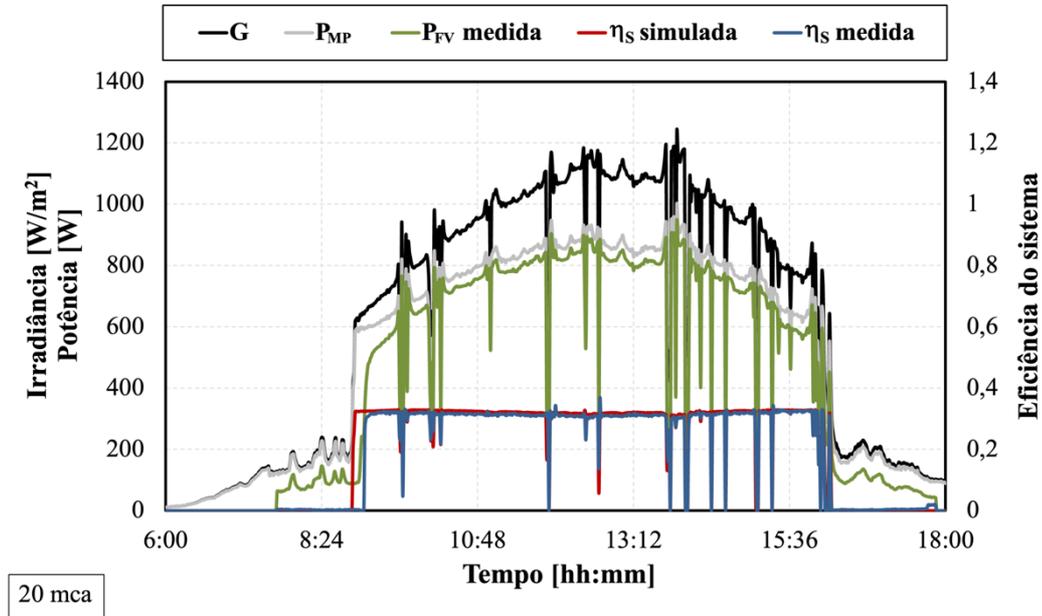
Em ambos os casos há uma semelhança nos perfis de vazão, porém com uma diferença nos valores obtidos que pode ser atribuída ao sistema de controle de manter a tensão fixa na curva I-V do gerador por meio do CFW-11, o qual não é especificamente projetado para sistemas fotovoltaicos, logo, não possui uma configuração dedicada para o SPMP. Nesta situação, optou-se por empregar esse sistema de controle PID. Essa estratégia, embora simples, por buscar a otimização do desempenho do sistema sem recorrer a uma tecnologia destinada ao rastreamento do ponto da curva I-V do GFV, pode ser uma causa do menor desempenho da motobomba.

A seleção da tensão do barramento c.c. foi baseada nos gráficos de distribuição de energia produzida em Belém-PA pelo gerador fotovoltaico, em função da sua tensão de máxima potência, conforme apresentado nos estudos de Silva (2019). A faixa de tensão indicada reflete os maiores níveis de potência acumulada ao longo das horas durante um ano típico, representando assim a faixa que melhor se adequa ao casamento de impedância entre a carga e a fonte geradora de energia elétrica (Brito, 2006). Segundo Silva (2019), no caso deste gerador fotovoltaico, a tensão deve ser mantida na faixa de 250 a 280 V_{CC}.

Utilizando a Figura 3.28 e a Figura 3.29 para exibir a comparação das potências do GFV e eficiências do sistema, percebe-se que no início e no fim da operação é onde há uma notável disparidade nos perfis de potência devido à diferença substancial na tensão do barramento c.c. Assim, em H = 20 mca, η_{SPMP} está próximo a 57 % para níveis inferiores a 220 W/m², e aumenta

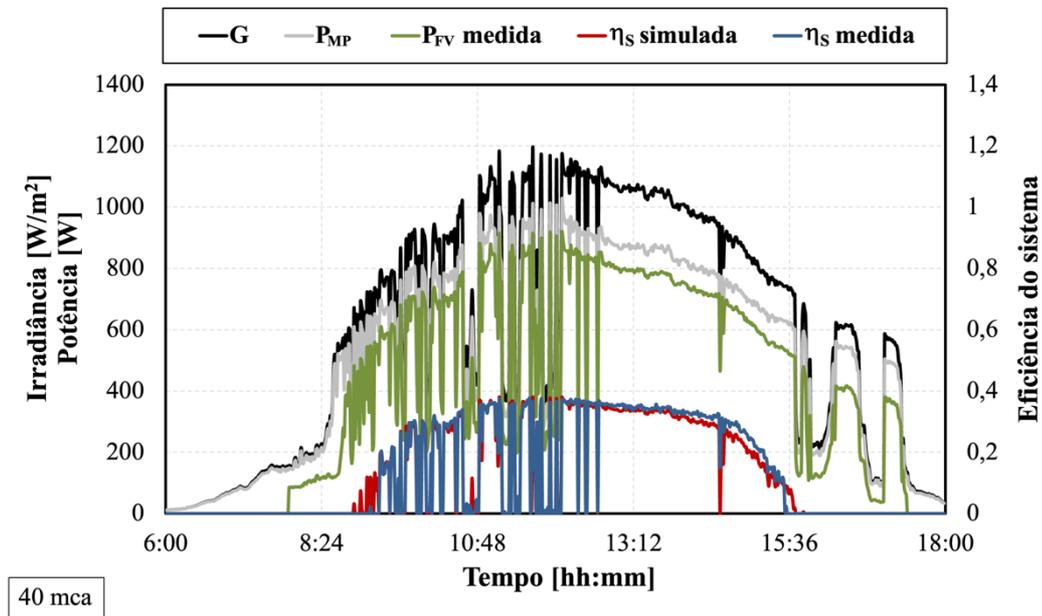
para 92 % quando ultrapassa 600 W/m^2 , com média de 89 %. Para 40 metros, a média de η_{SPMP} do exemplo foi de 85 %.

Figura 3.28 – Comparação das potências e eficiências do SFB 3 em 20 mca.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 3.29 – Comparação das potências e eficiências do SFB 3 em 40 mca.



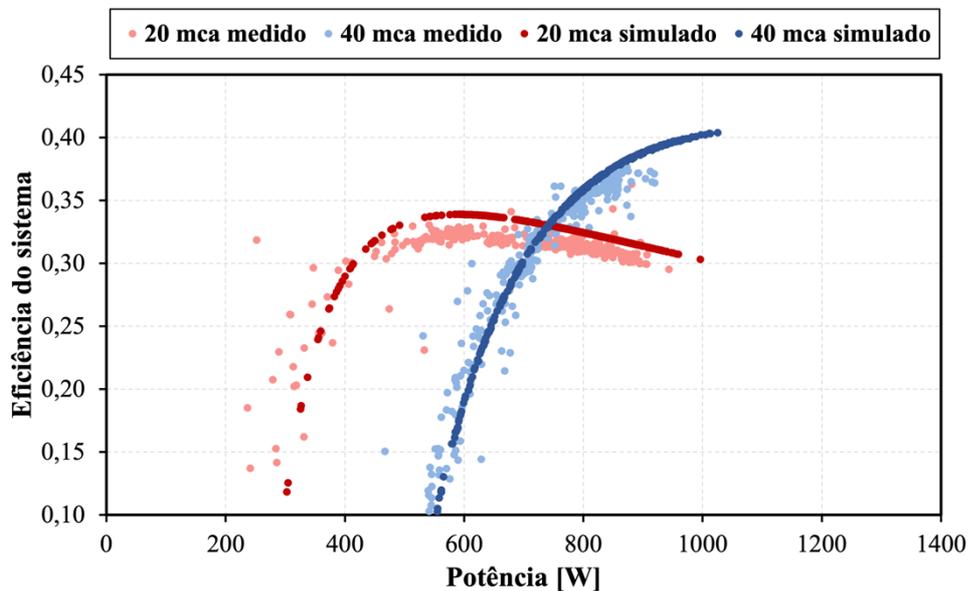
Fonte: Elaborada pelo autor.

Como essa situação não é prevista na simulação deste trabalho, incrementa-se o erro final. Isso ocorre porque as fórmulas utilizadas para calcular a potência fotovoltaica na simulação assumem um DCP que busca constantemente atingir a máxima potência do gerador. No entanto, esse comportamento não é replicado no SFB com o CFW-11. Conseqüentemente,

tanto a potência quanto a vazão simulada do SFB permaneceram mais elevadas em comparação com as medições realizadas.

Em contrapartida, as eficiências do sistema, se mantiveram bastante semelhantes ao obtido com a simulação. A Figura 3.30 exibe a comparação das curvas de eficiência do sistema para ambas as alturas manométricas. Observa-se uma maior precisão na previsão em comparação com outros sistemas. Para 20 metros, há uma maior diferença entre as curvas η_S , comparado com 40 metros. Ao analisarmos os perfis de vazão e de eficiência do sistema, fica evidente que a simulação foi capaz de fazer uma boa estimativa de η_S para o SFB 3, resultando em dados simulados mais alinhados com os medidos na bancada de testes.

Figura 3.30 – Curvas de eficiência do sistema no SFB 3.



Fonte: Elaborado pelo autor.

4 APLICAÇÃO DA METODOLOGIA PARA OBTENÇÃO DO PONTO DE MELHOR EFICIÊNCIA SOLAR

Esse capítulo apresenta os resultados obtidos com base na modelagem proposta por Muñoz (2015) e Santos (2022), mencionada no Capítulo 1, por intermédio do uso da simulação computacional no programa MATLAB, a qual prevê o comportamento de um sistema fotovoltaico de bombeamento específico. Assim, inseriram-se os dados de irradiância (G) e temperatura de operação da célula no simulador, e com base nas informações das curvas da motobomba e nas especificações dos geradores fotovoltaicos, foram iniciadas as simulações.

Conforme discutido no Capítulo 3, a programação em MATLAB considera um funcionamento ideal do SFB. No entanto, nos exemplos analisados, não foi possível prever completamente o modo de operação do controlador da bomba, uma vez que há diversos fatores a serem considerados, os quais não estão contemplados na metodologia. Esses fatores incluem a limitação de potência pela motobomba, a influência da tensão do barramento c.c. no valor eficaz máximo de tensão de saída do DCP (a exemplo da sobremodulação) e os métodos de controle PID de tensão fixa para otimizar a máxima potência do GFV sem o uso do seguidor do ponto de máxima potência (SPMP).

Nesse sentido, para iniciar os cálculos necessários para determinar um ponto de operação otimizado, foi crucial, primeiramente, compreender em que medida o comportamento do SFB na bancada de ensaios se aproxima do calculado pelo simulador no programa MATLAB. Ao final, algumas modificações foram aplicadas na programação para alcançar um perfil de desempenho mais próximo do acompanhado.

Neste capítulo, são apresentadas as discrepâncias dos pontos de melhor eficiência solar (PMES) nas diferentes situações apresentadas no capítulo anterior. Para isso, são detalhadas as comparações dos desempenhos teóricos dos três SFB, incluindo variações nas frequências de rotação, eficiências e os PMES obtidos para cada sistema. Ao todo foram utilizados 25 pontos de altura manométrica ($H = \{20:1:45\}$), cujo resultado da metodologia aponta para H que melhor otimiza a eficiência do SFB após um dia de operação.

4.1 Determinação dos dados de irradiância e temperatura de operação da célula

A região de Belém do Pará é caracterizada por três períodos: a época chuvosa, entre dezembro e maio; o período final chuvoso, entre junho e agosto; e a fase de estiagem, entre setembro e novembro, a qual há diminuição da frequência de chuvas (Bastos *et al.*, 2002). Além disso, Belém possui níveis de temperatura ambiente e de potencial de radiação solar elevadas,

associadas à localização da cidade, próxima a Linha do Equador. Essas características afetam o valor do PMES, que será diferente a cada dia.

De acordo com o programa SunData v3.0, desenvolvido pelo Laboratório de Modelagem e Estudos de Recursos Renováveis de Energia (LABREN), uma das divisões do Instituto Nacional de Pesquisas Especiais (INPE), baseado no trabalho de Pereira *et al.* (2017), a média anual da irradiação diária para a localidade é de 4,86 kWh/m² (ou 4,86 HSP), com a máxima em setembro (5,38 kWh/m²) e a mínima durante fevereiro (4,40 kWh/m²).

Não há uma previsão precisa do padrão de irradiância que incidirá em um determinado dia, apenas cenários possíveis. Logo, esse estudo utilizou dados de 10 dias com irradiações diárias entre a mínima (4,40 kWh/m²) e a máxima (5,38 kWh/m²). Por intermédio do simulador, foram obtidas as informações do PMES, eficiência do sistema e o volume acumulado. Ao final, foi calculada uma média dos 10 dias para determinar o PMES para os sistemas fotovoltaicos de bombeamento.

4.2 Definição do PMES para o SFB 1 e 2

Por serem sistemas semelhantes, de especificações iguais em ambos os SFB, os cálculos resultantes da metodologia de aquisição do PMES desse tópico foram considerados válidos para os dois. Elaboraram-se simulações para o gerador de oito, nove e dez módulos. Nesses cenários, aplicou-se a restrição de potência do DCP em função da motobomba, pois, como observado nos ensaios, em níveis elevados de irradiância, há limitações quando o desempenho se aproxima ao nominal.

Como mencionado previamente, a aquisição dos dados de irradiância e temperatura de operação da célula desses sistemas foram oriundos de uma célula de referência e sensor PT1000 ligados a um GFV próximo ao utilizado, cuja composição é feita por módulos de mesmo modelo (SW245 da SolarWorld), com mesma inclinação de 12° e azimute voltado para o norte magnético. Dentre os dias medidos, separou-se dados com irradiações acumuladas diárias entre 4,45 e 5,20 kWh/m² (ou em horas de sol pleno – HSP – 4,45 e 5,20). Os perfis de irradiância e temperatura de operação de cada dia podem ser visualizados no Apêndice A.

4.2.1 Simulação com o gerador de oito módulos SW245

A Tabela 4.1 apresenta as simulações realizadas com oito módulos SW245, levando em conta sua potência máxima nominal (1850 W_P), e com a limitação pela motobomba. Conforme mostrado no Capítulo 2, o ponto de melhor eficiência (PME) da Leão 4R5PA está a uma altura manométrica (H_{PME}) de 41,8 mca, aproximado para esse estudo em 42 mca. Com a simulação

para 10 dias de medição, obteve-se uma média de 33,8 mca para o ponto de melhor eficiência solar (H_{PMES}), uma diferença de 8 metros em relação a altura manométrica indicada para o PME.

Tabela 4.1 – Valores de PMES obtidos em diferentes dias para o GFV 8 módulos e com limitação de potência.

Dias medidos	Irradiação [HSP]	H_{PMES} [mca]	$\eta_S - PMES$ [%]	Volume acumulado – PMES [m ³]	$\eta_S - PME$ (42 mca) [%]	Volume acumulado – PME [m ³]
Dia 1	4,77	33	30,4	24,6	28,5	17,7
Dia 2	5,01	37	31,8	23,0	31,1	19,5
Dia 3	5,20	33	30,8	26,6	29,7	19,5
Dia 4	4,62	34	29,6	24,6	27,5	16,4
Dia 5	4,90	31	31,0	28,0	28,7	18,5
Dia 6	4,88	36	31,5	22,3	30,6	18,1
Dia 7	4,89	35	32,0	24,4	31,0	19,2
Dia 8	4,96	35	32,4	24,7	30,9	19,2
Dia 9	4,51	32	30,2	23,5	27,3	15,7
Dia 10	4,45	32	28,6	21,0	27,8	15,0
Média	4,82	33,8	30,8	24,3	29,3	17,9

Fonte: Elaborado pelo autor.

Em comparação com o cenário sem a restrição de potência (ver Tabela 4.2), observa-se que em termos dos valores médios de eficiência e volume de água bombeado, os resultados são muito parecidos, considerando a simulação para os mesmos dias da Tabela 4.1. No entanto, a Tabela 4.2 não reflete a realidade, pois conforme observado nos ensaios, há limitações aplicadas tanto pelo DCP, ao parametrizar as proteções, quanto pela motobomba, o que resulta, portanto, em maiores erros ao determinar a altura manométrica do PMES.

Tabela 4.2 – Valores de PMES obtidos em diferentes dias para o GFV 8 módulos e sem limitação de potência.

Dias medidos	Irradiação [HSP]	H_{PMES} [mca]	$\eta_S - PMES$ [%]	Volume acumulado – PMES [m ³]	$\eta_S - PME$ (42 mca) [%]	Volume acumulado – PME [m ³]
Dia 1	4,77	34	30,3	25,2	29,4	19,8
Dia 2	5,01	41	32,1	22,8	32,1	22,3
Dia 3	5,20	39	30,8	24,0	30,7	22,5
Dia 4	4,62	33	29,4	24,5	28,7	18,8
Dia 5	4,90	31	30,9	28,9	29,5	20,4
Dia 6	4,88	40	31,8	22,3	31,8	21,2
Dia 7	4,89	38	32,0	24,2	31,8	21,8
Dia 8	4,96	37	32,3	25,1	31,6	21,7
Dia 9	4,51	33	30,0	23,9	28,3	17,7
Dia 10	4,45	42	29,1	17,9	29,1	17,9
Média	4,82	36,8	30,9	23,9	30,3	20,4

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2.1.1 Influência dos perfis de irradiância ao PMES

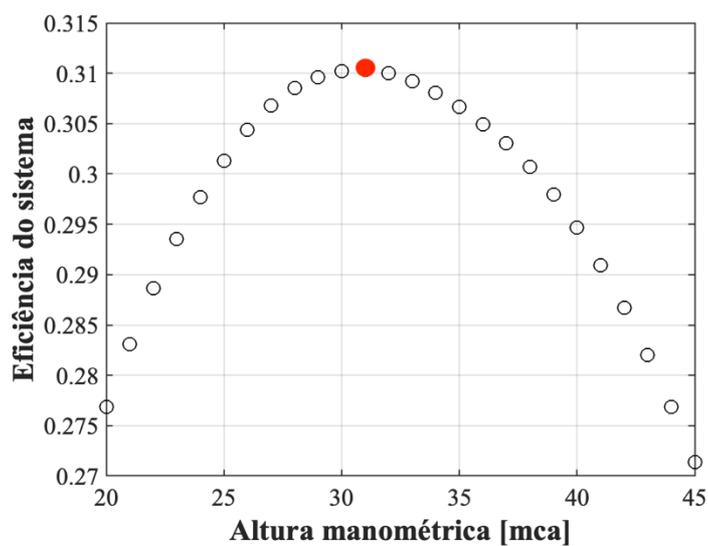
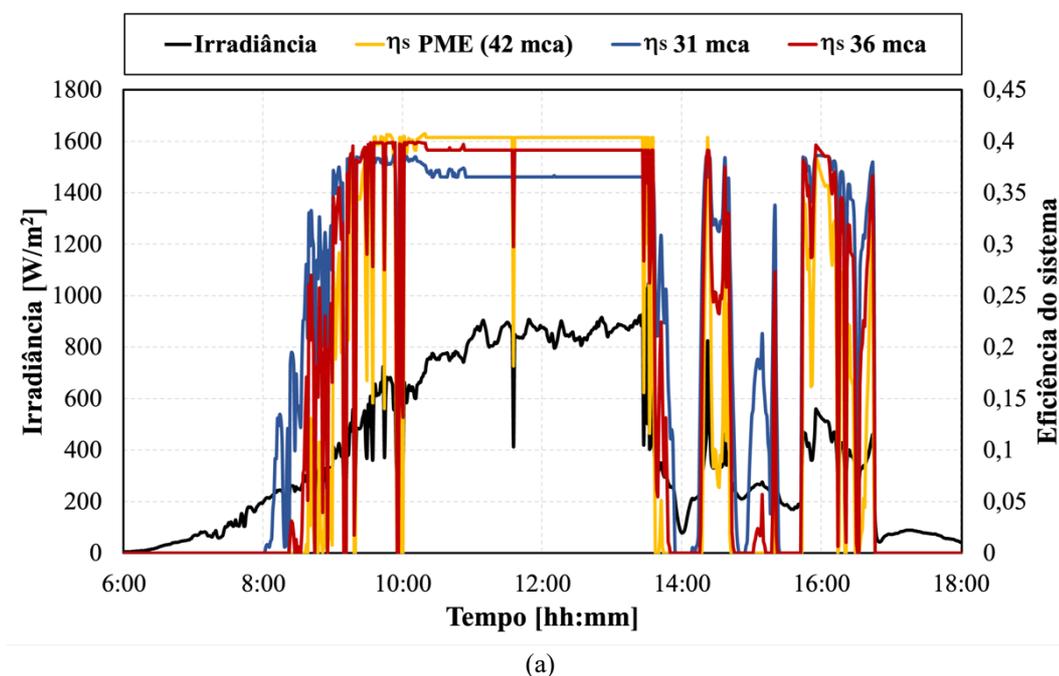
Nota-se que as alturas manométricas necessárias para atingir o PMES podem apresentar diferenças notáveis mesmo em situações com irradiações acumuladas semelhantes, como nos casos dos dias 5 e 6 da Tabela 4.1, com 4,90 e 4,88 HSP e H_{PMES} de 31 e 36 mca, respectivamente. Essa diferença é ainda mais acentuada quando não é considerado a limitação de potência (Tabela 4.2).

Por outro lado, dias com horas de sol pleno divergentes podem resultar em pontos de operação otimizados semelhantes, tal como nos dias 1 e 3 da Tabela 4.1. Essas observações reforçam que distintos perfis de irradiância geram pontos específicos e a mínima diferença influencia na determinação do PMES. Por conta disso, um único conjunto de dados não é o suficiente para concluir H_{PMES} a ser adotada, e para aumentar a confiabilidade, diversos testes devem ser feitos a fim de adquirir uma convergência de valores.

Foram elaboradas comparações entre os dias 5 e 6, com horas de sol pleno semelhantes. O objetivo era compreender as razões por trás da diferença de 5 mca observada na Tabela 4.1. A Figura 4.1 mostra as curvas de eficiência do sistema do SFB para o H_{PMES} do dia 5 (31 mca), do dia 6 (36 mca) e para o PME ($H_{PME} \approx 42$ mca). Ambos os dias foram marcados por várias intermitências na irradiância devido ao período chuvoso durante o mês de fevereiro de 2023 em Belém-PA.

No dia 5, conforme mostrado na Figura 4.1, verifica-se que nos níveis mais elevados de irradiância (800-1000 W/m²) a eficiência do sistema a 31 mca é menor do que a observada nas simulações com alturas de 36 e 42 mca. Além disso, ela decresce em comparação com η_S na mesma altura manométrica (31 mca) para a faixa de irradiância entre 500 e 800 W/m². Contudo, à medida que a radiação solar diminui ao longo do início da tarde, a eficiência do sistema para 31 mca se destaca, especialmente quando a irradiância se manteve abaixo de 500 W/m².

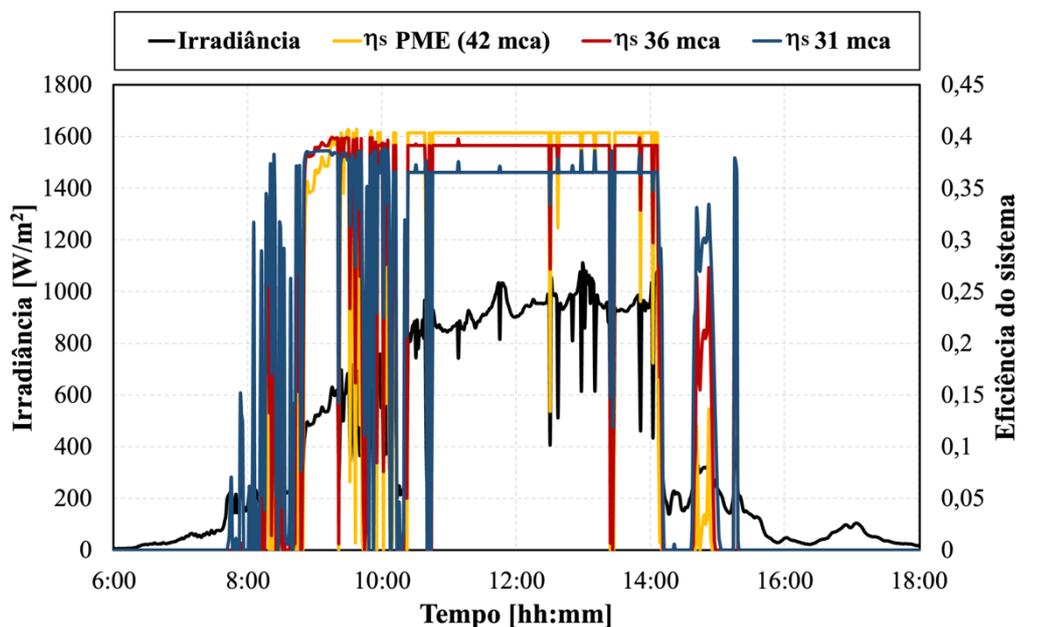
Figura 4.1 – Gráfico de irradiância e η_s em 31, 36 e 42 mca no dia 5 (a); Eficiências do sistema para $H = \{20:1:45\}$ no dia 5 (b).



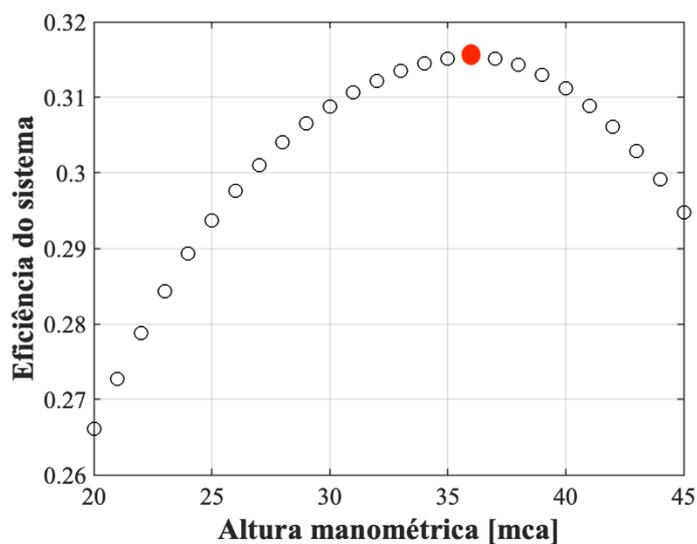
(b)
Fonte: Elaborada pelo autor.

No dia 6, na Figura 4.2, notou-se uma extensão maior de níveis de irradiância mais elevados, persistindo até cerca de 14h15min, seguida de uma queda que seguiu um padrão semelhante ao do dia 5. No entanto, foi observado que o SFB teve uma menor atividade a partir desse período, devido a uma queda mais acentuada na irradiância, a níveis em que a motobomba não poderia operar. Os gráficos refletem que em condições de irradiância superiores a $500 W/m^2$, a eficiência do sistema a 36 mca se destaca em comparação a 31 mca. No que se refere ao PME, a eficiência do sistema se mantém mais alta durante picos de irradiância.

Figura 4.2 – Gráfico de irradiância e η_s em 31, 36 e 42 mca no dia 6 (a); Eficiências do sistema para $H = \{20:1:45\}$ no dia 6 (b).



(a)



(b)

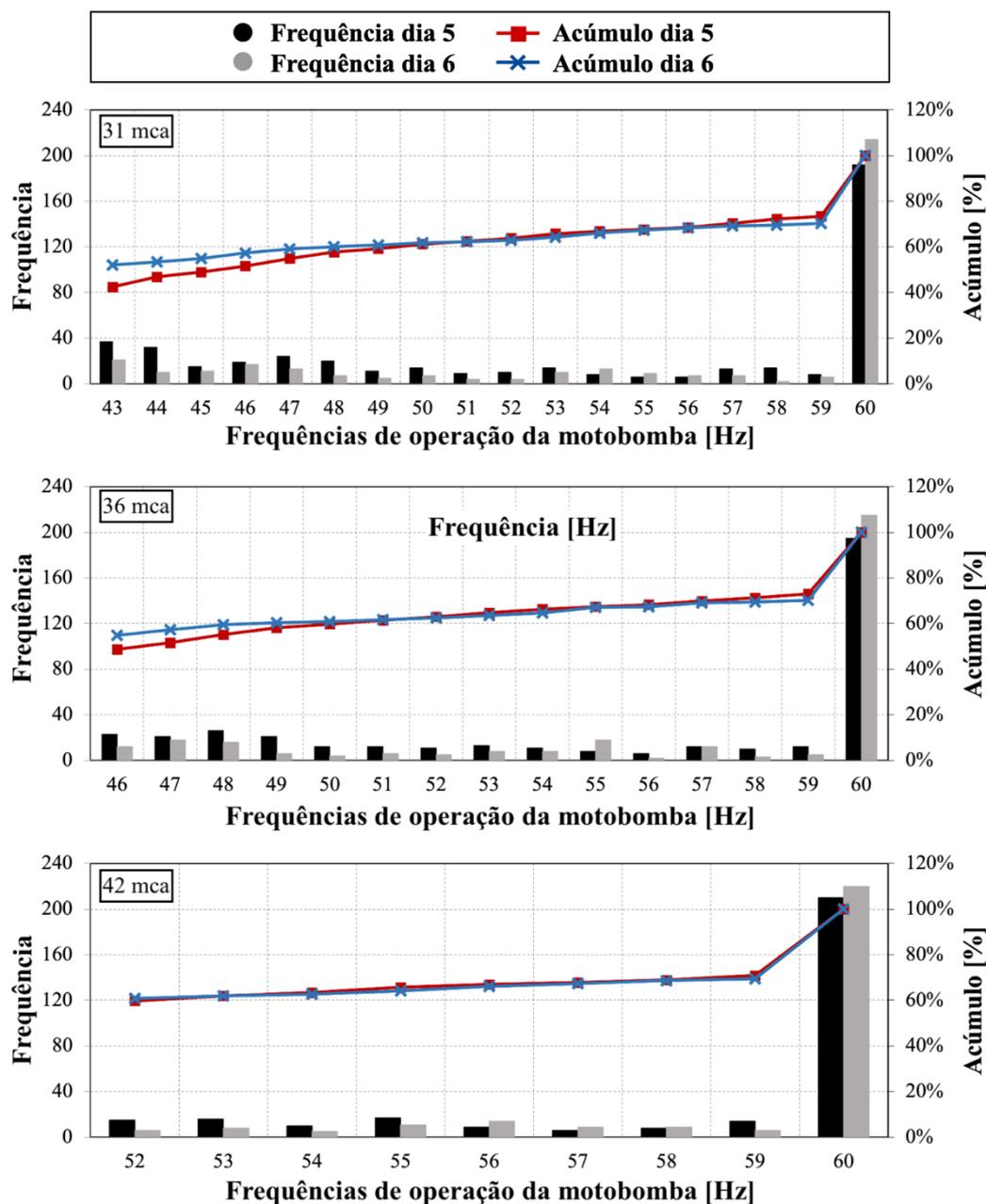
Fonte: Elaborada pelo autor.

Com base nas particularidades de ambos os dias, é plausível inferir que os períodos de maior incidência de irradiância moderada (entre 300-500 W/m^2) no dia 5 influenciaram na diminuição de H_{PMEs} em comparação ao dia 6. Isso ocorreu porque a motobomba teve a oportunidade de operar por um período maior durante a tarde no dia 5, e possibilitou trabalhar com frequências de rotação mais baixas.

Elaborando-se gráficos para analisar a distribuição das frequências de operação do SFB em ambas os cenários e incrementar na interpretação dos resultados. A Figura 4.3 ilustra as três simulações dessas alturas manométricas, com o intuito de analisar a quantidade de vezes que a

motobomba operou em diferentes faixas de frequência desde o início da vazão no sistema. Uma observação inicial relevante é a utilização demasiada da faixa de 60 Hz, indicando que o uso do GFV de potência elevada ($1850 W_P$) acarretou a atuação frequente da motobomba na proximidade de sua capacidade máxima. Essa faixa é mais predominante no dia 6, e pode ser atribuído ao maior período de irradiância elevada. No dia 5, percebe-se um ligeiro aumento nas operações em faixas menores, possivelmente devido aos níveis mais moderados durante a tarde.

Figura 4.3 – Distribuição de faixas de frequências para diferentes alturas manométricas do dia 5 e 6.



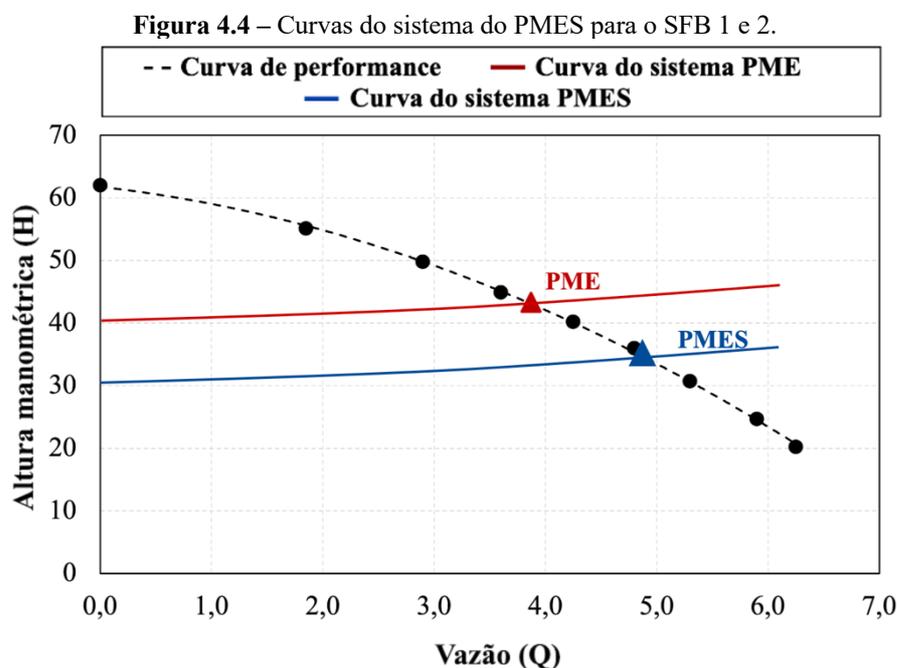
Fonte: Elaborado pelo autor.

No Capítulo 1, foi detalhada a relação entre as frequências de rotação e o ponto máximo de eficiência solar. Esse ponto, geralmente inferior à nominal, reflete a realidade de operação

da bomba em um sistema fotovoltaico, onde a potência disponível não é suficiente para manter em 60 Hz de forma constante. Quanto maior a atuação da bomba na frequência nominal, mais próximo o PMES se aproxima de PME. A variação na curva de irradiância ao longo do dia resulta em diferentes perfis de eficiência do sistema, impactando na definição do PMES.

Por conseguinte, conclui-se que, mesmo em dias com semelhantes irradiações, os diferentes perfis de irradiância podem influenciar na determinação do PMES. O ponto de operação é estabelecido com base na frequência das variações nos níveis de irradiância, sejam eles baixos, médios ou altos.

Em um dia claro, com poucas perturbações na radiação solar, o motor ligado à bomba opera com frequência próxima a 60 Hz na maior parte do tempo ou em boa parte dele, indicando que o gerador fornece energia suficiente para atender à potência nominal da motobomba. Nesse cenário, o H_{PMES} se aproxima ao H_{PME} . Por outro lado, em dias nublados ou chuvosos, a redução nos níveis de irradiância resulta em um PMES mais afastado da curva de desempenho em comparação ao PME. Para obter um valor de PMES mais próximo do ideal para o SFB, constatou-se que uma maior quantidade de simulações em diferentes cenários se mostrou mais confiável. Na Figura 4.4 ilustra a comparação de curvas do sistema aproximadas ao real para o PME e PMES do SFB 1. Nota-se que o ponto de operação otimizado foi deslocado para a direita na curva de desempenho (performance) da bomba.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Ao planejar a transição de uma alimentação de rede para a fotovoltaica em uma situação real, o projetista deve verificar previamente se a curva do sistema do poço, no qual a

motobomba será instalada, está próxima do indicado com o ponto máximo de eficiência solar, a fim de otimizar a eficiência energética. Nesse contexto, se a curva do sistema de um poço estiver próxima ao PME, a utilização da motobomba com uma alimentação fotovoltaica poderia resultar não apenas em menor eficiência, mas também em uma diminuição do acúmulo do fluido no final do dia. Isso ocorre porque a frequência de operação do motor estaria, por diversas vezes, inferior ao nominal, acarretando menores vazões.

4.2.2 Simulação com o gerador de nove e dez módulos SW245

Como demonstrado no Capítulo 3, a utilização de apenas 8 módulos resultou em um desempenho aquém do esperado na simulação, devido à tensão do barramento c.c. não atender às necessidades do controlador e da motobomba. Diante disso, incluíram-se a adição de mais módulos em série para melhorar o funcionamento do sistema. A Tabela 4.3 apresenta os valores de PMES calculados com o GFV de 9 e 10 módulos SW245, respectivamente.

Tabela 4.3 – Valores de PMES obtidos em diferentes dias para o GFV com 9 e 10 módulos e com limitação de potência.

Nº de módulos	Dias medidos	H _{PMES} [mca]	η_s – PMES [%]	Volume acumulado – PMES [m ³]	η_s – PME (42 mca) [%]	Volume acumulado – PME [m ³]
9 módulos	Dia 1	33	31,3	27,0	29,5	19,4
	Dia 2	37	31,9	24,2	31,4	20,5
	Dia 3	33	31,7	28,7	30,1	20,7
	Dia 4	32	30,6	26,2	28,4	18,0
	Dia 5	32	32,2	29,9	29,8	20,4
	Dia 6	35	32,0	24,5	31,1	19,2
	Dia 7	35	32,7	26,4	31,7	20,7
	Dia 8	36	33,0	26,0	32,1	21,3
	Dia 9	33	31,1	24,9	28,8	17,6
	Dia 10	31	29,6	23,8	27,8	15,9
	Média	33,7	31,6	26,2	30,1	19,4
10 módulos	Dia 1	34	32,0	28,0	30,4	20,9
	Dia 2	37	32,1	25,3	31,6	21,4
	Dia 3	34	32,5	29,6	30,8	22,0
	Dia 4	33	31,4	27,4	29,4	19,6
	Dia 5	33	33,2	31,2	30,9	22,1
	Dia 6	35	32,6	26,0	31,5	20,3
	Dia 7	36	33,4	27,3	32,3	22,0
	Dia 8	37	33,5	27,0	32,9	23,0
	Dia 9	35	31,8	25,2	30,0	19,4
	Dia 10	32	30,5	24,8	28,1	16,9
	Média	34,6	32,3	27,2	30,8	20,8

Fonte: Elaborado pelo autor.

Ao analisar os valores relacionados à média H_{PMES} , é notável um leve incremento nos dois cenários. Ao observar a Tabela 4.3, notou-se que o acréscimo na potência do GFV não necessariamente resultou em um H_{PMES} maior. Ao examinar a média de H_{PMES} com nove módulos, houve uma leve redução na altura manométrica em relação ao uso de oito módulos, em cerca de 0,1 metro. Isso possibilita indicar que o incremento de P_{FV} levou ao início da operação da motobomba em irradiâncias mais baixas, momento em que anteriormente não havia fluxo de água.

Ao analisar o conjunto de simulações, é possível constatar que os pontos de operação para ao sistema fotovoltaico nas situações da Tabela 4.3 não apresentam uma discrepância significativa capaz de influenciar drasticamente na eficiência do sistema em relação ao uso da altura manométrica ideal para o gerador de oito módulos SW245, a qual possui a potência máxima nominal mais próxima a indicada pelas fabricantes dos DCP. As médias oscilaram entre 33,7 e 34,6 metros de coluna de água, com mediana em 33 e 34,5 mca, respectivamente para nove e dez módulos SW245.

4.3 Definição do PMES para o SFB 3

Para o SFB 3, adotou-se a mesma abordagem de medição ao longo de outros 10 dias esporádicos, baseando-se na célula fotovoltaica e no PT1000 conectados ao GFV com módulos da Empresa Solaris modelo S55P, com o intuito de obter dados entre a mínima (4,40 kWh/m²) e a máxima (5,38 kWh/m²) e com média de 4,86 kWh/m² para Belém-PA. Os dados utilizados variaram de 4,42 até 5,30 HSP, apresentando uma média de 4,96 HSP (Tabela 4.4), com perfis disponíveis no Apêndice B. Embora utilize a Leão 4R5PA, o principal contraste em relação aos dois primeiros sistemas é do gerador com quase metade da potência nominal.

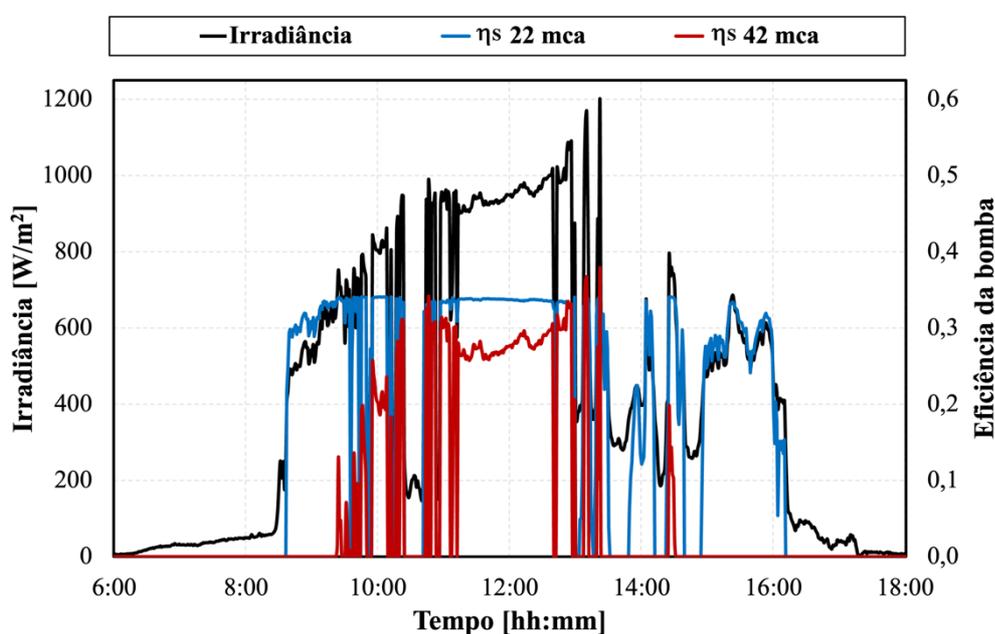
Tabela 4.4 – Valores de PMES obtidos em diferentes dias para o SFB 3.

Dias medidos	Irradiação [HSP]	H_{PMES} [mca]	$\eta_s - PMES$ [%]	Volume acumulado – PMES [m ³]	$\eta_s - PME$ (42 mca) [%]	Volume acumulado – PME [m ³]
Dia 1	4,55	20	22,9	16,4	10,8	3,6
Dia 2	5,19	22	27,1	20,0	9,4	3,5
Dia 3	4,88	22	27,2	18,7	13,9	4,9
Dia 4	4,99	22	24,2	16,4	13,9	4,8
Dia 5	4,42	23	25,5	15,0	12,7	4,0
Dia 6	5,07	26	28,0	16,5	17,6	6,2
Dia 7	4,84	26	27,3	15,6	16,5	5,7
Dia 8	5,30	21	29,0	22,4	3,0	1,1
Dia 9	5,24	20	29,0	23,1	2,1	1,0
Dia 10	5,17	21	28,3	20,9	9,7	3,5
Média	4,96	22,3	26,8	18,5	11,0	3,8

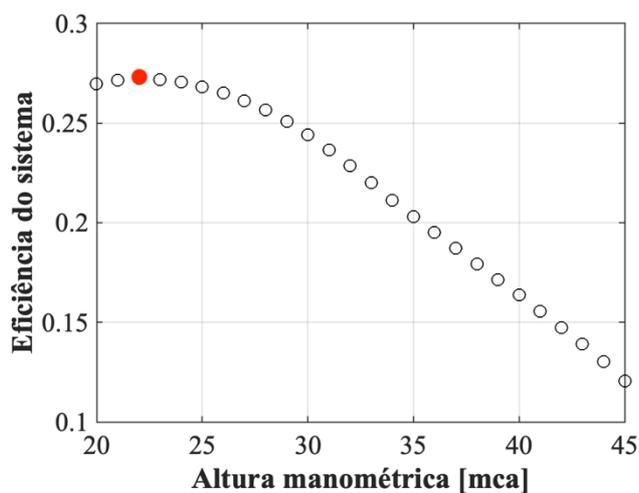
Fonte: Elaborado pelo autor.

Com isso, a expectativa era de um comportamento diferenciado no sistema, uma vez que não haveria problemas decorrentes de limitações de potência, porém o desempenho máximo do GFV dificilmente alcançaria a potência requerida para o motor em operação nominal ($P_{MRN} = 1050 \text{ W}$). A média do PMES obtida nas 10 medições foi de 22,3 mca, um valor significativamente inferior em comparação com a média dos outros dois sistemas. No caso do dia 3, que registrou irradiação diária mais próxima da média anual, foram elaborados gráficos como base para a análise do SFB 3. A Figura 4.5 ilustra a comparação entre os perfis de eficiência do sistema do PMES e do PME para esse dia.

Figura 4.5 – Gráfico de irradiação e η_s em 22 e 42 mca no dia 3 (a); Eficiências do sistema para $H = \{20:1:45\}$ no dia 3 (b).



(a)



(b)

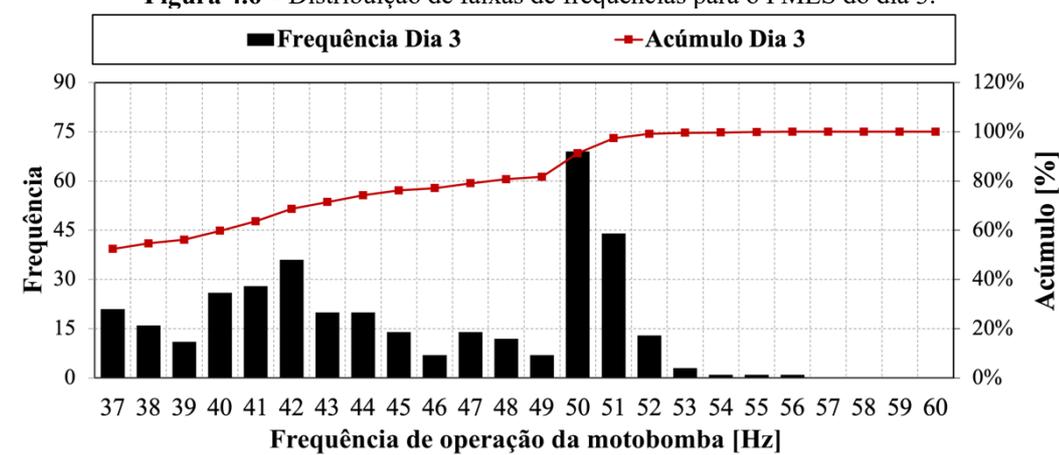
Fonte: Elaborada pelo autor.

Neste sistema, há um sombreamento causado por uma árvore no início da manhã, persistindo até por volta das 8h30min, e outro sombreamento próximo das 17h00min. Apesar dessas limitações de horário, a incidência de irradiância nesses períodos é relativamente baixa, tendo um impacto reduzido no desempenho do SFB.

Fica nítido uma discrepância na eficiência do sistema ao longo do dia, dado que a motobomba não recebe potência suficiente para iniciar a vazão em 42 mca. Com isso, há apenas alguns momentos em que a eficiência do PME supera a do PMES, durante alguns picos momentâneos de irradiância. Na parte da tarde, exceto por um breve período, não houve uma operação eficaz com a altura manométrica de 42 mca. Através da análise da comparação das eficiências do sistema para $H = \{20:1:45\}$ no dia 3 (Figura 4.5b), é evidenciado que em uma curva de sistema próxima ao indicado pelo PME resultaria em uma acentuada queda de eficiência no sistema. Para que a motobomba inicie o deslocamento de água em H_{PME} , é necessário alcançar cerca de 650 W/m^2 no GFV. Já para H_{PMES} , a irradiância deve ser superior a 350 W/m^2 no gerador.

A Figura 4.6 apresenta as faixas de frequência de operação para o dia 3. Com base na simulação deste dia, verificou-se que a bomba não conseguiu atuar em 60 Hz, atingindo o máximo em 56 Hz. A operação da bomba a 22 mca se concentrou principalmente na faixa entre 37-52 Hz, sendo que mais de 90 % do volume bombeado se encontra em frequências menores ou iguais a 50 Hz.

Figura 4.6 – Distribuição de faixas de frequências para o PMES do dia 3.

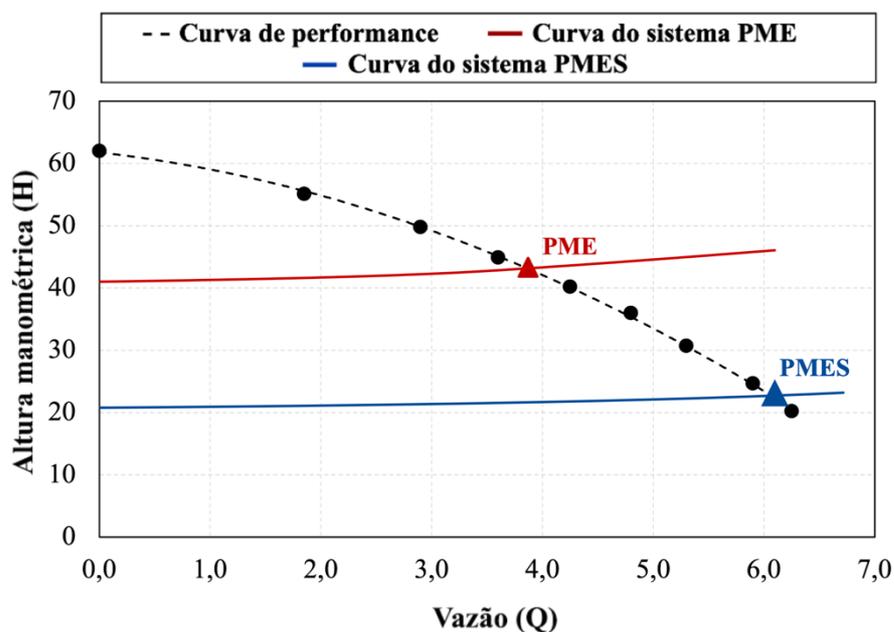


Fonte: Elaborado pelo autor.

Dessa forma, conclui-se que o gerador S55P de 970 W_P não possuiu potência suficiente para alcançar a produção da motobomba em frequência nominal. Esse cenário teve um impacto direto na alteração do PMES em comparação com os dois primeiros sistemas, resultando em uma queda de cerca de 20 metros de coluna d'água em relação ao H_{PME} . No entanto, devido à restrição de modelos disponíveis no laboratório, não foi viável integrar outros módulos ao GFV,

uma vez que a alta tensão de circuito aberto ultrapassaria a capacidade máxima suportada pelo conversor de frequência (CF) de 400 V, gerando falhas constantes no sistema e inviabilizando o início de operação do SFB (Silva, 2019). A relação das curvas do sistema do PME e PMES para o SFB 3 está caracterizada na Figura 4.7.

Figura 4.7 – Curvas do sistema do PMES e PME para o SFB 3.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A partir da situação apresentada, caso esse sistema estivesse operando em H_{PME} , tornaria-se claro a redução drástica de desempenho, resultando em baixa eficiência. Devido à utilização de um gerador fotovoltaico de menor potência, era prevista uma diminuição do ponto de operação ideal para a bomba. Assim, de forma a otimizar o desempenho desse sistema, é necessário utilizar um poço com curva de sistema próxima ao PMES para obter maior efetividade e aproveitamento de energia. Dessa forma, viabilizaria a extração do máximo desempenho, promovendo uma operação mais eficaz e econômica para atender às necessidades de uma comunidade de forma adequada.

CONCLUSÃO

Ao longo deste estudo, abordou-se os sistemas fotovoltaicos de bombeamento como uma alternativa viável para comunidades com restrições de acesso à energia elétrica da rede local. As pesquisas relacionadas à aplicação da metodologia introduzida por Santos (2022) e Muñoz *et al.* (2015), trouxeram diversas discussões sobre a modelagem do SFB, incluindo o controle do dispositivo de condicionamento de potência, que regula a potência fornecida à motobomba, assim como as medidas de proteção contra sobrecargas. Explorou-se algumas abordagens para o controle da tensão na curva I-V do GFV, como o uso do seguidor do ponto de máxima potência e da aplicação da estratégia de operação em tensão fixa, apresentada no estudo de Silva (2019).

Devido ao uso da bancada de testes para manter uma pressão constante durante os experimentos com SFB, este estudo não é adequado para poços sensíveis às variações de vazão da motobomba, uma vez que podem impactar significativamente o nível da superfície do fluido, ocasionando elevados rebaixamentos. Como resultado, a diferença de pressão devido ao rebaixamento é considerável. Portanto, a metodologia é direcionada a poços com diâmetros maiores, menos propenso às variações no nível do fluido causadas pela intermitência da vazão. O controle de pressão da bancada de testes obteve um desempenho satisfatório nos ensaios nos três SFB analisados.

Investigou-se o impacto da restrição imposta pela motobomba à potência fornecida pelo DCP durante os ensaios. Essa variável foi incluída na simulação para gerar resultados em cenários nos quais o DCP limita a potência do GFV de forma contínua, em função da motobomba. Também foram analisados, com base nos ensaios, os problemas de sobremodulação causados pelos níveis menores de tensão do barramento c.c. do GFV, resultando em um valor eficaz da tensão de saída no DCP inferior ao nominal e, conseqüentemente, prejudicando o desempenho da motobomba.

A obtenção de dados mais concretos sobre o sistema é essencial para garantir a confiabilidade da metodologia. No entanto, devido à constante indisponibilidade pública das informações detalhadas sobre as curvas de eficiência de cada componente do SFB, a utilização de valores teóricos, provenientes de fontes bibliográficas, demonstrou ser uma alternativa válida. Notou-se que, mesmo com essa técnica, as curvas de eficiência apresentaram uma proximidade considerável, e que reforçou a confiabilidade dos resultados discutidos no estudo. Em situações que demandam maior precisão, a obtenção das curvas reais dos componentes seria a abordagem mais indicada para aprimorar os cálculos do programa computacional.

Todavia, mesmo com a semelhança das curvas de eficiência, entendeu-se que, em muitos casos, a simulação não considera falhas e problemas que possam afetar o funcionamento dos SFB. Os cálculos analíticos utilizam equações que consideram uma operação teórica, que incluem apenas a variação nominal da máxima potência do GFV, e não as influências das tensões e correntes da curva I-V do gerador realizadas pelo seguidor do ponto de máxima potência do DCP.

Nos SFB 1 e 2, embora tenham obtido a potência necessária para o pleno funcionamento da motobomba, houve uma leve queda no desempenho, em relação ao simulado, devido à tensão de saída do DCP ser insuficiente para atingir vazões nominais. Isso resultou em uma diminuição nos perfis de vazão em alguns dos cenários, algo que não foi previsto nos cálculos. Como solução, adicionou-se mais módulos ao GFV para incrementar a tensão do barramento c.c. e melhorar o desempenho. Ao optar por essa alternativa, foi possível obter uma maior conformidade com o simulado. Na simulação, a discrepância no apontamento do PMES foi mínima, registrando um aumento de apenas 0,1 e 0,8 metro de coluna d'água com a inserção do GFV de nove e dez módulos, em sequência.

No entanto, essa alternativa levou a um aumento da potência máxima do GFV, resultando em um sobredimensionamento do SFB. No caso do controlador do SFB 1, essa estratégia também acarretou sobrecargas que poderiam representar um risco para o funcionamento adequado da motobomba, uma vez que para esse DCP, não houve uma regulação apropriada da potência fornecida, por ser utilizado para motobombas de até 3 cv e por possuir parametrização simples. Com isso, não houve a possibilidade de incluir a potência nominal da motobomba, resultando na entrega de uma potência superior à requerida.

Além disso, em relação ao seguidor do ponto de máxima potência, houve algumas divergências em relação aos ensaios. No segundo sistema, o SPMP não se comportou conforme o esperado, sendo frequentemente fixado em potências baixas, mesmo em condições de alta radiação solar. No caso do SFB 3, não houve a tecnologia necessária para a implementação do SPMP no conversor de frequência, o que levou à programação de uma estratégia para manter a tensão do barramento de corrente contínua (c.c.) fixa. Isso resultou em uma queda de desempenho, uma vez que o CF apenas adapta a corrente do GFV às variações da irradiância incidente na curva I-V.

Entretanto, mesmo diante dos diversos cenários apresentados, a metodologia demonstrou uma capacidade notável em prever os desempenhos na entrega de vazão pela bomba, assemelhando-se em muitos casos à realidade. Isso a posiciona como uma opção viável

para aproximar o ponto de operação mais otimizado de uma motobomba para o sistema fotovoltaico de bombeamento.

Em uma análise de viabilidade técnica para a instalação de uma motobomba, o engenheiro deve avaliar se o poço projetado possui uma curva de sistema alinhada ao ponto de operação otimizado para o SFB. O uso de um poço com curva do sistema próxima a da altura manométrica indicada pelo PME da bomba poderia resultar em uma drástica redução de eficiência energética, como é possível analisar para o caso do SFB 3. Aumentar a potência do GFV pode aproximar o PMES do PME, porém, além de resultar em maiores gastos financeiros, a motobomba e o DCP poderiam sofrer sobrecargas, acarretando problemas nos equipamentos.

Além da eficiência energética, é crucial também assegurar se o fluxo de vazão da motobomba atenderá aos objetivos do projetista. Em situações em que a produção de água com o PME de um modelo de bomba, com operação em frequência nominal, seria ideal para suprir as necessidades de uma comunidade, a adoção da energia fotovoltaica para o bombeamento de água poderia resultar em níveis reduzidos de vazão, ocasionando problemas de escassez de água para os residentes.

Portanto, a estratégia mais apropriada seria utilizar modelos de motobombas que indiquem um PMES mais próximo da curva do sistema do poço, garantindo assim uma eficiência energética otimizada, e que proporcione níveis de vazão adequados para suprir à comunidade. Para isso, o método utilizado nesta pesquisa é de considerável relevância. Mediante contribuições com algumas aplicações práticas e teóricas, este estudo sobre o PMES teve com o objetivo de aprimorar o uso de sistemas fotovoltaicos de bombeamento de forma eficiente e econômica para populações remotas e com recursos limitados.

Para futuras investigações relacionadas a este tema, seria interessante considerar os estudos sobre:

- a) Inclusão de uma interface intuitiva à programação para facilitar o manuseio pelo usuário;
- b) Adição à programação para diferentes cenários que possam considerar a avaliação ao longo de um ano de dados de irradiância e temperatura;
- c) Aperfeiçoar os aspectos associados às limitações de potência e o uso de diferentes metodologias de controle do ponto da curva I-V;
- d) O uso de curvas reais nos cálculos e incertezas nas estimativas dos cálculos, a fim de incrementar a confiabilidade do método e aplicar na prática em diferentes sistemas fotovoltaicos de bombeamento;

- e) A utilização de motobombas e controladores de menor tensão e potência para melhorar no resultado obtido com a metodologia;
- f) Incorporar na metodologia os efeitos na atuação do SFB em poços de diâmetros menores, cuja variações nos níveis da superfície do fluido têm impactos significativos no desempenho da motobomba.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALONSO-ABELA, M.; CHENLO, F.; BLANCO, J. **Optimización del Uso de Convertidores de Frecuencia con Bombas Centrífugas y Motores Trifásicos en Sistemas de Bombeo Fotovoltaico**. Era Solar: Energías Renovables, n. 2. 2002. p. 14-35.
- ARAÚJO, A.; RANK, N.; BUENO, T. **Análise dos fatores de perdas nos sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica em Curitiba**. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba.
- BASTOS; T. X.; PACHECO, N. A.; NECHET, D.; SÁ, T. D. DE A. **Aspectos climáticos de Belém nos últimos cem anos**. Belém. Embrapa Amazônia Oriental. 2002. 31p.
- BRASIL, A.N. **Máquinas termo hidráulicas de fluxo**. Itaúna: Universidade de Itaúna, 2010.
- BRASIL. Lei Nº 11.445, de 5 de janeiro de 2007. **Estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico e dá outras providências**. Brasília, DF. Diário Oficial da União. 2007.
- BRITO, A. U. **Otimização do Acoplamento de Geradores Fotovoltaicos a Motores de Corrente Alternada Através de Conversores de Frequência Comerciais para Acionar Bombas Centrífugas**. 2006. 83p. Tese de Doutorado - Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- BRITO, A. U.; ZILLES, R. **Conversores de Frequência, uma Solução para Diminuir a Dependência aos Equipamentos Importados em Aplicações de Bombeamento Fotovoltaico**. São Paulo: Universidade de São Paulo, Instituto de Eletrotécnica e Energia, Laboratório de Sistemas Fotovoltaicos, 2004.
- BORDALO, C. A. L. **Pelo direito humano ao acesso à água potável na região das águas: uma análise da exclusão e do déficit dos serviços de abastecimento de água potável à população da Amazônia brasileira**. Novos Cadernos NAEA, v. 25, n. 1, 2022.
- BUREAL OF ENERGY EFFICIENCY (BEE). **Energy Efficiency in Electrical Utilities**. 4. Ed. New Delhi, Ministry of Power, Government of India, Cap 6. 2015.
- BURT, C. M.; PIAO, X.; GAUDI, F.; BUSCH, B.; TAUFIK, N. F. N. **Electric motor efficiency under variable frequencies and loads**. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, v. 134, n. 2. Março/ abril 2008. p. 129-136.
- ÇENGEL, Y. A.; CIMBALA, J. M. **Mecânica dos Fluidos**. 3. Ed. AMGH Editora. 2015. 1016 p.
- DUTRA J. B. A. **Eficiência Energética no Controle da Vazão em Sistemas de Bombeamento de Água – uso de válvula e controle de velocidade**. Paraíba do Sul, Apostila. 2005. 18 p.
- EBARA LTDA. **Catálogo de Seleção de Curvas e Cabos – Modelos 4BPS/ BHS/ QC/ Camisas de Sucção 60Hz**. Ebara LTDA. 2019. Disponível em: <https://www.ebara.com.br/downloads>. Acesso em: 16 out. 2023.

FORTES, M. Z.; TAVARES, G. M.; RIGUEIRA, A. dos S.; ANTUNES, V. de S. F.; PEREIRA, L. F. **Eficientização energética com ajuste do ponto de operação de bombas centrifugas**. Rio de Janeiro, 27º Congresso Brasileiro de Manutenção. 2012.

FRANKLIN ELECTRIC S.A. **Motores Submersos 4”**: Uma nova geração de soluções para bombeamento de águas subterrâneas. Franklin Electric Indústria de Motobombas S.A. Joinville. 2015. Disponível em: <https://schneidermotobombas.blob.core.windows.net/media/204807/manual-motores-aim.pdf>. Acesso em: 16 out. 2023.

HOSOI, C. **Comunidades isoladas exigem um saneamento sob medida**. Revista DAE, v. 187. 2011. p. 4-12.

HSU, J. S.; KUECK, J. D.; OLSZEWSKI, M.; CASADA, D. A.; OTADUY, P. J.; TOLBERT, L. M. **Comparison of induction motor field efficiency evaluation methods**. *Conference Record of the 1996 IEEE Industry Applications Conference Thirty-First IAS Annual Meeting*, IEEE. 1996. p. 703-712.

HT. HT-instruments. **Página inicial**. [s.l.]. [s.d.]. Disponível em: <https://www.ht-instruments.com/pt-br/>. Acesso em: 16 out. 2023.

HT. **I-V400w – SOLAR I-Vw I-V500w – SOLAR I-Ve: Manual de utilização**. 2017. Acesso em: https://www.ht-instruments.com/media/filer_public/8a/47/8a47ce04-4775-4623-b854-733c92cab52a/man_solar-02_itenesdefrpt4-00exe.pdf. Acesso em 16 out. 2023.

HT. **Solar-02 Environmental Parameter Data Logger**. 2022. Acesso em: https://www.ht-instruments.com/media/filer_public/8a/47/8a47ce04-4775-4623-b854-733c92cab52a/man_solar-02_itenesdefrpt4-00exe.pdf. Acesso em 16 out. 2023.

INTEGRALTEC. **Inversor de Frequência de Energia Solar para Motores MODELOS IVS 100 E IVS 101 (1,5CV / 3CV / 5CV 6CV)**. Integraltec Tecnologias. [s.l.]. 2022. Disponível em: <https://www.integraltec.com.br/drive-solar-1-5cv>. Acesso em 16 out. 2023.

INTELBRAS S.A. **Manual do Usuário**. Intelbras S.A, China, 2022. Disponível em: <https://www.intelbras.com/pt-br/inversor-drive-solar-trifasico-5cv-off-grid-ds-5380>. Acesso em 16 out. 2023.

KARASSIK, I. J.; MESSINA, J. P.; COOPER, P.; HEALD, C. C. **Pump handbook**. 3. Ed. New York, McGraw-Hill. 2001.

LEÃO S.A. **Tabela de Curvas Características 60Hz**. Joinville, Leão S.A. 2023. Disponível em: https://bombasleao.blob.core.windows.net/media/302416/leao_lista_curvas_60hz_2023_web.pdf. Acesso em 16 out. 2023.

LEM S.A. **Current Transducer HAS 50 ... 600-S**. LEM International S.A, Meyrin. 2022. Disponível em: <https://www.lem.com/en/product-list/has-50s>. Acesso em 16 out. 2023.

LI, Y.; LIU, M.; LAU, J.; ZHANG, B. **A novel method to determine the motor efficiency under variable speed operations and partial load conditions**. Applied Energy, v. 144. 2015. p. 234-240.

LU, B. **Energy Usage Evaluation and Condition Monitoring for Electric Machines Using Wireless Sensor Networks**. 2006. 219p. Tese de Doutorado. School of Electrical and Computer Engineering – Georgia Institute of Technology, Georgia.

LU, B.; HABELTLER, T. G.; HARLEY, R. G. **A nonintrusive and in-service motor-efficiency estimation method using air-gap torque with considerations of condition monitoring**. IEEE transactions on Industry Applications. IEEE, v. 44, n. 6. 2008. p. 1666-1674.

MACÊDO, W. N. **Análise do Fator de Dimensionamento do Inversor aplicado a Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede**. 2004. 183p. Tese de Doutorado. Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia – Universidade de São Paulo, São Paulo.

MACINTYRE, A. **Bombas e Instalações de Bombeamento**. 2. Ed. Rio de Janeiro, LTC. 1997.

MARANHÃO, G. N. de A. **Controlador Fuzzy para Uso em Conversores de Frequência Aplicado à Sistemas Fotovoltaicos de Bombeamento**. 2015. 114p. Tese de Doutorado - Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Pará, Belém.

MCCOY, G.A.; DOUGLASS, J. G. **Premium Efficiency Motor Selection and Application Guide**. Washington, U. S. Department of Energy (U.S. DOE). 2014. Disponível em: <https://www.energy.gov/eere/amo/articles/premium-efficiency-motor-selection-and-application-guide-handbook-industry>. Acesso em: 16 out. 2023.

MELO, R. O. de. **Condicionamento de Potência de uma Motobomba em um Sistema Fotovoltaico de Bombeamento Através de um Conversor de Frequência**. 2004. 65p. Dissertação de Mestrado. Centro de Tecnologia e Geociências – Departamento de Energia Nuclear, Universidade Federal de Pernambuco, Recife.

MEGABRAS. Megabras. **PowerPad 3945-B: Analisador de Energia Trifásico**. [s.l.]. 2023. Disponível em: <https://www.megabras.com.br/pt-br/produtos/analizador-energia/analizador-de-energia-3945-B.php>. Acesso em 16 out. 2023.

MORENO, M. A.; PLANELLS, P.; CÓRCOLES, J. I.; TARJUELO, J. M.; CARRIÓN, P. A. **Development of a new methodology to obtain the characteristic pump curves that minimize the total cost at pumping stations**. Biosystems Engineering, v. 102, n. 1. 2009. p. 95-105.

MORALES, L. R. V. **Sistemas fotovoltaicos de bombeamento com conversores de frequência e motobombas de fabricação nacional: avaliação e orientações para sua implantação**. 2016. 143p. Tese de Doutorado - Programa de Pós-Graduação em Energia, Universidade de São Paulo, São Paulo.

MUÑOZ, J.; CARRILLO J. M.; MARTÍNEZ-MORENO, F.; CARRASCO, L. M.; NARVARTE, L. **Modeling and simulation of large PV pumping systems**. Hamburg, Proceedings of the 31th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition. 2015.

NATURAL RESOURCES OF CANADA/ RESSOURCES NATURELLES CANADA. **Premium Efficiency-Motors**. Ottawa, NRC. 2004a. Disponível em: <https://publications.gc.ca/site/eng/9.688560/publication.html>. Acesso em: 16 out. 2023.

NATURAL RESOURCES OF CANADA/ RESSOURCES NATURELLES CANADA. **Energy-Efficient Motor Systems: Assessment Guide**. Ottawa, NRC. 2004b. Disponível em: <https://publications.gc.ca/site/eng/290084/publication.html>. Acesso em: 16 out. 2023.

NOVUS LTDA. **Módulo de Aquisição de Dados Novus modelo Filedlogger**. [s.l.] [s.d.]. Disponível em: https://www.novus.com.br/downloads/Arquivos/manual_fieldlogger_v16x_i_português.pdf. Acesso em: 16 out. 2023.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). Resolução nº 64/292, de 28 de julho de 2010: **Reconhecimento do direito humano à água potável e ao saneamento**. Disponível em: <https://documents-dds-ny.un.org/doc/UNDOC/GEN/N09/479/35/PDF/N0947935.pdf?OpenElement>. Acesso em: 31 jan. 2024.

PEREIRA, P.F.; SOUZA, A.C.; SANTOS, I.N. **Modelagem e Avaliação de Desempenho das Principais Técnicas de Controle de MPPT Empregadas na Geração Fotovoltaica**. Uberlândia, XVI CEEL. Outubro de 2016. Disponível em: https://www.peteletricaufu.com.br/static/ceel/doc/artigos/artigos2016/ceel2016_artigo012_r01.pdf. Acesso em: 16 out. 2023.

PEREIRA, E. B.; MARTINS, F. R.; GONÇALVES, A. R.; COSTA, R. S.; LIMA, F. L.; RÜTHER, R.; ABREU, S. L.; TIEPOLO, G. M.; PEREIRA, S. V.; SOUZA, J. G. **Atlas brasileiro de energia solar**. 2. Ed. São José dos Campos, INPE. 2017. 80p.

PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. **Manual de Engenharia para sistemas fotovoltaicos**. 2014.

PINHO, J. T. *et al.* **Sistemas híbridos: Soluções Energéticas para a Amazônia**. Brasília: Ministério de Minas e Energia, 2008.

POMILIO, J. A.; PAREDES, H. K. M.; OTA, J. I. Y.; DECKMANN, S. M. **Eletrônica de potência para geração, transmissão e distribuição de energia elétrica**. Departamento de Sistemas e Energia, Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas. 2021.

RIVALIN, L.; PRITONI, M.; STABAT, P.; MARCHIO, D. *Adaptation of fan motor and VFD efficiency correlations using Bayesian inference*. *Science and Technology for the Built Environment*, v. 25, n. 7. 2019. p. 836-848.

ROMA, W. N. L. **Introdução às máquinas hidráulicas**. Publicação da Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 2001.

SÁ, S. P de C.; SEEMANAPALLI, S. V. K. **Modelo de Simulação de Poços de Grandes Diâmetros e a Confecção de Curvas Características Hidrodinâmicas destes Poços no Semi-Árido Paraibano**. Belo Horizonte, XIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. 1999.

SANTOS, W. S. dos. **Modelagem e de Desenvolvimento de um Conversor de Frequência Aplicado à Sistemas Fotovoltaicos de Bombeamento de Água**. 2022. 174p. Tese de Doutorado - Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Pará, Belém.

SANTOS, W. S. **Sistema Fotovoltaico de Bombeamento Baseado em Conversores de Frequência e Bombas Centrífugas Comerciais Utilizando Controle Fuzzy Externo com Tensão Fixa**. 2016. 125p. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Engenharia de Processos, Universidade Federal do Pará, Belém.

SANTOS, W. S. dos; TORRES, P. F.; BRITO, A. U.; MANITO, A. R. A.; PINTO FILHO, G. F.; 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. 2021. p. 46-59.

SCHMIDT, H.; JANTSCH, M.; SCHMID, J. **Results of the concerted action on Power conditioning and control**. EUROPEAN PHOTOVOLTAIC SOLAR ENERGY CONFERENCE, 1992, Montreux, Switzerland. Proceedings. Montreux, 1992.

SHRESTHA, J. N.; KUMAR JHA, D. A.; KARKI, E. R. **Training manual on solar PV pumping system**. Nepal, Alternative Energy Promotion Centre (AEPC). 2014.

SILVA, G. B. de S.; SANTOS, W. S. dos; MACÊDO, W. N. **Avaliação Teórica Experimental para Sistemas Fotovoltaicos de Bombeamento**. Revista FT, v. 28, n. 129. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.5281/zenodo.10393597>.

SILVA, G. B. de S. **Ensaio de Sistemas Fotovoltaicos de Bombeamento Mediante Simulação de Alturas Manométricas em uma Bancada**. 2019. 95p. Trabalho de Conclusão de Curso – Faculdade de Engenharia Elétrica e Biomédica, Universidade Federal do Pará, Belém.

SOLARWORLD. **SW 245 poly/ Version 2.0 and 2.5 Frame**. [s.l.]. 2011. Disponível em: https://s3.amazonaws.com/ecodirect_docs/SOLARWORLD/SW245_Poly.pdf. Acesso em: 16 out. 2023.

SOUZA, C. M. N.; NOGUEIRA, A. S.; VASCONCELOS, A. S. da S.; SILVA, A. de S. **Abastecimento de água em comunidades ribeirinhas da Amazônia brasileira e promoção da saúde: análise de modelo de intervenção e de gestão**. Belém, Novos Cadernos NAEA, v. 15, n. 2, 2013.

ULANICKI, B.; KAHLER, J.; COULBECK, B. **Modeling the efficiency and power characteristics of a pump group**. Journal of water resources planning and management, v. 134, n. 1. 2008. p. 88-93.

VALIANTZAS, J. D. **Modified Hazen–Williams and Darcy–Weisbach equations for friction and local head losses along irrigation laterals**. Journal of irrigation and drainage engineering, v. 131, n. 4. 2005. p. 342-350.

VASCONCELOS, M. B. **Poços para Captação de Águas Subterrâneas: Revisão de Conceitos e Proposta de Nomenclatura.** Águas Subterrâneas, [S. l.], 2015. Disponível em: <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/28288>. Acesso em: 11 fev. 2024.

VILLALVA, M. G.; Gazoli, J. R. **Energia Solar Fotovoltaica**, São Paulo, Editora Érica. 2013.

WEG S.A. **CFW11 – Inversor de Frequência.** São Paulo, WEG Automação S/A. 2020. Disponível em: https://www.weg.net/catalog/weg/BR/pt/Automação-e-Controle-Industrial/Drives/Inversores-de-Frequência/Drives-para-Sistemas-Industriais/Inversor-de-Frequência-CFW11/Inversor-de-Frequência-CFW11/p/MKT_WDC_BRAZIL_PRODUCT_INVERTER_CFW11. Acesso em: 16 out. 2023.

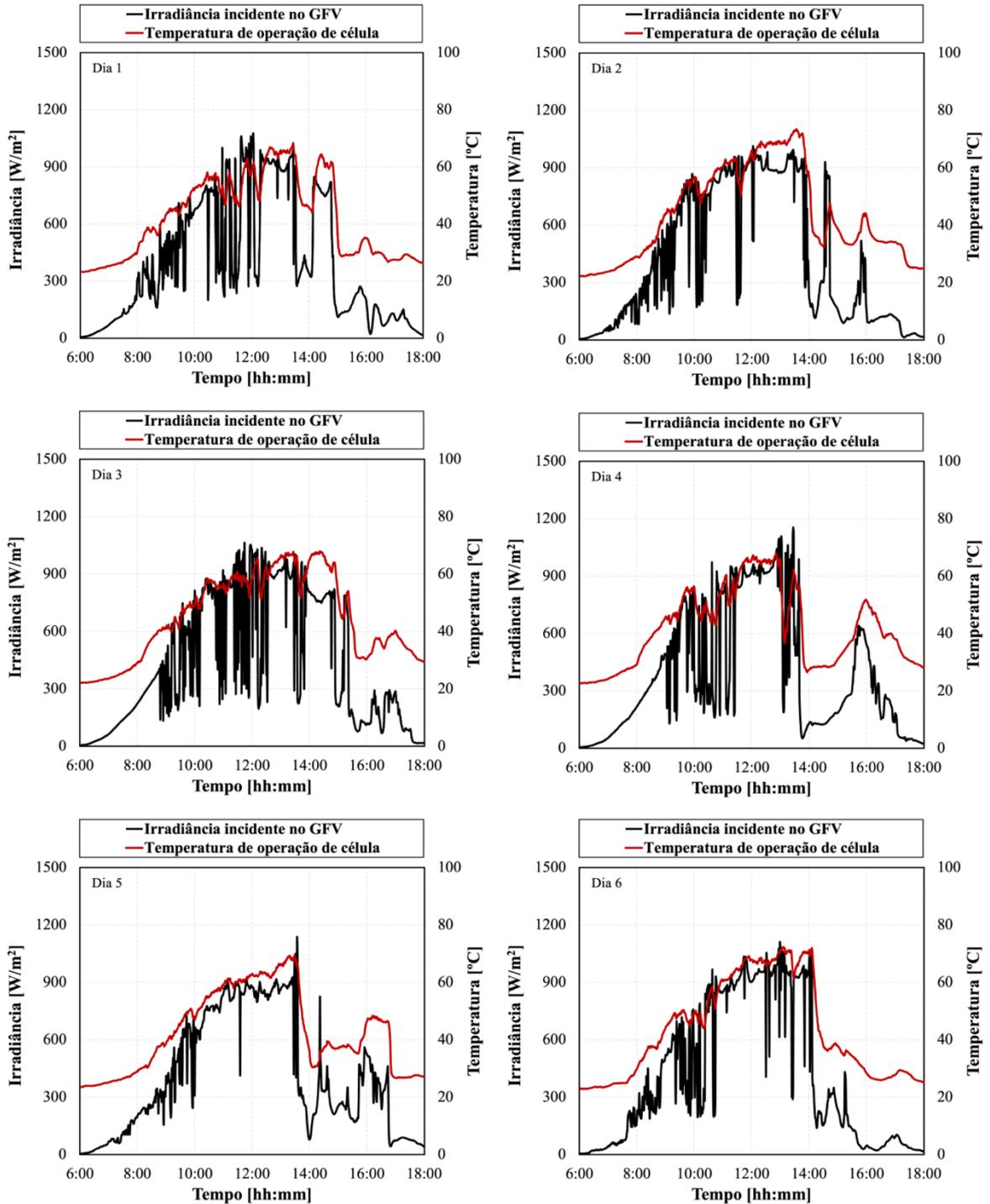
WEG S.A. **Frequency Inverter Manual – CFW-08.** São Paulo, WEG Automação S/A. 2019. Disponível em: <https://static.weg.net/medias/downloadcenter/hf7/hc8/WEG-cfw08-users-manual-0899.5242-manual-en.pdf>. Acesso em: 16 out. 2023.

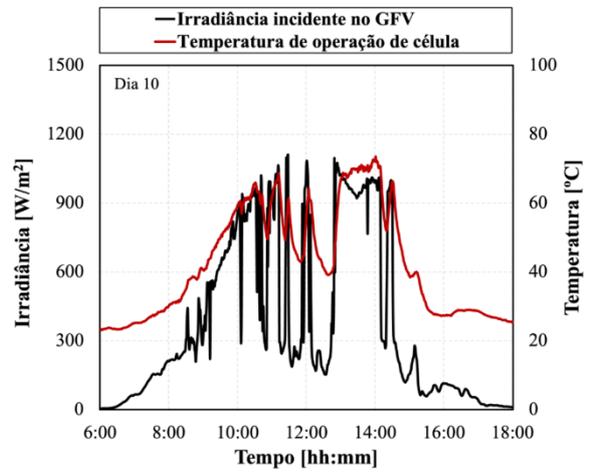
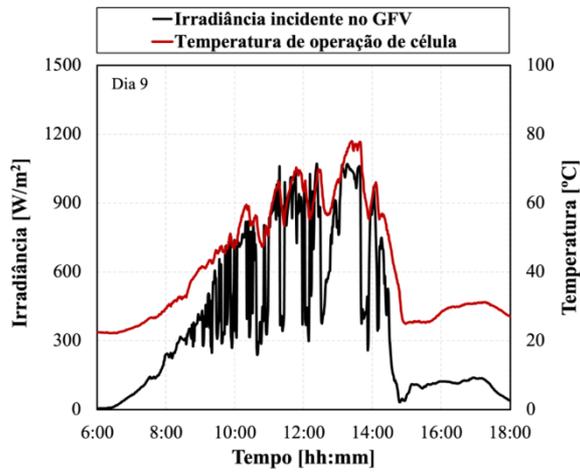
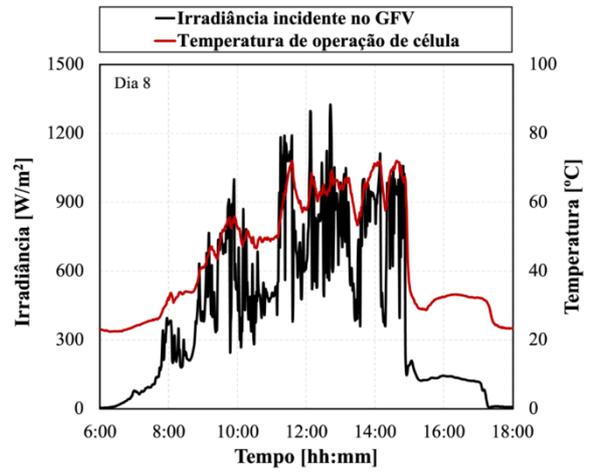
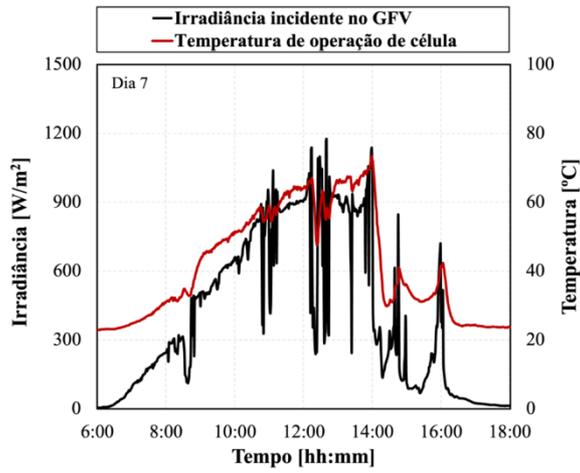
WORLD BANK GROUP. **Solar Pumping: The Basics.** World Bank, 2018.

ZILLES, R.; MACÊDO, W. N.; GALHARDO, M. A. B.; OLIVEIRA, S. H. F. de. **Sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica.** São Paulo, Oficina de Textos. 2012.

APÊNDICES

APÊNDICE A: PERFIS DE IRRADIÂNCIA E TEMPERATURA DE CÉLULA DAS SIMULAÇÕES DO PMES DOS SFB 1 E 2





APÊNDICE B: PERFIS DE IRRADIÂNCIA E TEMPERATURA DE CÉLULA DAS SIMULAÇÕES DO PMES DO SFB 3

