

Trabalho de Conclusão de Curso

**DESENVOLVIMENTO DE UM MODELO NUMÉRICO PARA
ESTIMAR A RELAÇÃO DE DESCARGA EM FUNÇÃO DA
RADIAÇÃO E ALTURA MANOMÉTRICA EM SISTEMAS
DE BOMBEAMENTO FOTOVOLTAICO**

Guilherme Augusto de Matheucci e Silva Teixeira



Universidade Federal de Santa Catarina
Curso de Graduação em
Engenharia Sanitária e Ambiental

Guilherme Augusto de Matheucci e Silva Teixeira

**DESENVOLVIMENTO DE UM MODELO NUMÉRICO PARA
ESTIMAR A OSCILAÇÃO DA RELAÇÃO DE DESCARGA
EM FUNÇÃO DA RADIAÇÃO E ALTURA MANOMÉTRICA
EM SISTEMAS DE BOMBEAMENTO FOTOVOLTAICO**

Trabalho apresentado à Universidade
Federal de Santa Catarina para Con-
clusão de Graduação em Engenharia
Sanitária e Ambiental.

Orientador: Prof. Ramon Lucas Dal-
sasso.

Florianópolis, 2017

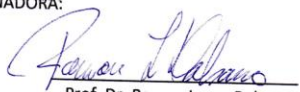
CENTRO TECNOLÓGICO
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL

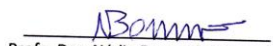
DESENVOLVIMENTO DE UM MODELO NUMÉRICO PARA ESTIMAR A OSCILAÇÃO DA
RELAÇÃO DE DESCARGA EM FUNÇÃO DA RADIAÇÃO E ALTURA MANOMÉTRICA EM
SISTEMAS DE BOMBEAMENTO FOTOVOLTAICO

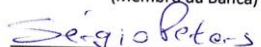
GUILHERME AUGUSTO DE MATHEUCCI E SILVA TEIXEIRA

Trabalho submetido à Banca Examinadora como
parte dos requisitos para Conclusão do Curso de
Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental-
TCC II

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. Ramon Lucas Dalsasso
(Orientador)


Profa. Dra. Nádia Bernardi Bonumá
(Membro da Banca)


Prof. Dr. Sérgio Peters
(Membro da Banca)

FLORIANÓPOLIS, (SC)
NOVEMBRO/2017

AGRADECIMENTOS

A gratidão é um sentimento ao mesmo tempo complexo e simples. De alguma forma, a maior parte das pessoas que passaram pela minha vida foram relevantes para o meu crescimento, desde as boas, que me deram apoio; às ruins, que me promoveram o amadurecimento.

Vale-se citar, sobretudo, aqueles que iniciaram todo o processo e me geraram, meus pais Julio Teixeira e Rossana Teixeira. Agradeço-os por todo o carinho que me deram, pela educação que me proporcionaram, seja dentro de casa, seja dando condições para eu ter tido uma boa formação.

Como familiares, não pode ser esquecida a contribuição dos meus avós João Pedro, Maria Zeli, Miranda Teixeira, Valmor Teixeira (já falecido), responsáveis por dar raiz a ambas as famílias.

Agradeço ao meu irmão Alexandre por ter sido meu grande companheiro durante boa parte da minha vida, me incentivando a pensar *fora da caixa* e compartilhando momentos de alegria e de tristeza. Também à sua esposa Monique por ter me dado um segundo irmão (ela mesma) desde 2003.

Cito os participantes do projeto da Funasa, que me concederam uma bolsa de pesquisa, que surgiu o tema do TCC. Incluo meu orientador Ramon Dalsasso, meus antecessores, Alesandra e Joana.

Como corpo técnico, agradeço aos professores que me ajudaram no desenvolvimento do conhecimento necessário para o trabalho, como o Sérgio Peters, Nádia Bomumá e Sílvia Nassar. Não me esqueço dos demais professores durante toda a minha vida que propiciaram meu crescimento profissional.

Dedico muitos agradecimentos ao Paulo, que me acompanhou durante todos esses meses de TCC, me dando apoio nos momentos difíceis, felicitando-me nos de alegria e sempre estando ao meu lado quando precisava.

Falando em amigos, não posso de deixar de citar todos aqueles que fazem parte da minha vida e não me canso de cultivar. Mesmo que as distâncias e trabalhos nos mantenham distantes, o sentimento por todos continuo o mesmo. Obrigado a todos os meus amigos do curso, do colégio, do futebol, do tênis, de Rio do Sul, de Bombinhas, dos grupos sociais. Não vale citar todos porque a distração me fará esquecer de alguém.

Obrigado por tudo!

RESUMO

O abastecimento de água em comunidades isoladas é um dos principais desafios para a gestão de recursos hídricos. Frente às localidades distantes da rede elétrica e dos sistemas de distribuição, o bombeamento fotovoltaico surge como uma das alternativas apresentadas para garantir o suprimento hídrico necessário para a continuidade das atividades de certas populações rurais. Portanto, este trabalho tem como objetivo elaborar um modelo numérico que busque indicar a oscilação da relação de descarga (Q/Q_p) pela radiação e altura manométrica, em sistemas de bombeamento fotovoltaico. A criação de equações representativas é necessária pois as curvas características dos equipamentos de recalque mostram apenas a variação da vazão para uma determinada insolação, considerada radiação plena. O modelo busca adaptar essas curvas para qualquer valor apresentado, adquirindo a relação entre a vazão real e a vazão plena, formando uma razão chamada relação de descarga (Q/Q_p). Dessa forma, é possível minimizar os erros de dimensionamento de reservatórios, promovendo um ganho aos usuários que dependem exclusivamente desse sistema. A análise foi realizada com base em dados bibliográficos e em um projeto piloto situado em uma propriedade rural na cidade de Orleans, em Santa Catarina. Para a verificação da correlação entre as variáveis, foram utilizados métodos estatísticos, avaliando a tendência de cada parâmetro de entrada do modelo. Para a geração das equações, foram aplicadas ferramentas computacionais, de forma a minimizar a distância quadrática entre os dados reais e os propostos analiticamente. Foram desenvolvidos três modelos, segundo sua categoria de regressão: linear, linearizado e não linear, a fim de verificar qual representa a realidade encontrada com um equilíbrio entre aderência e simplicidade. Para observar a viabilidade dos mesmos, foram analisados o grau do ajuste e os desvios locais em cada uma das situações. Observou-se que o modelo de regressão linear foi o mais indicado neste estudo, devido à baixa complexidade e boa representatividade. O de regressão linearizada obteve problemas ao se distanciar dos dados de campo, enquanto o não linear foi efetivo, mas com elaboração complexa que não justificou seu uso, em primeira ordem.

Palavras-chave: Abastecimento de Água, Bombeamento Fotovoltaico, Modelagem

RESUMEN

El abastecimiento de agua en comunidades aisladas es uno de los principales desafíos para la gestión de los recursos hídricos. Frente a esas localidades distantes de la red eléctrica y de los sistemas de distribución, el bombeo fotovoltaico surge como una de las alternativas para garantizar el suministro hídrico necesario para la continuidad de las actividades de ciertas poblaciones rurales. Por lo tanto, este trabajo tiene como objetivo la elaboración de un modelo numérico que busca indicar la oscilación de la relación de descarga (Q/Q_P) por la radiación y altura manométrica, en sistemas de bombeo fotovoltaico. La creación de ecuaciones representativas es necesaria pues las curvas características de una bomba muestran sólo la variación del caudal para una determinada insolación, considerada radiación plena. El modelo busca adaptar esas curvas a cualquier valor presentado, adquiriendo la relación entre el caudal real y el caudal pleno, formando una razón llamada relación de descarga (Q/Q_P) y de esta forma, es posible minimizar los errores de dimensionamiento de depósitos, promoviendo una ganancia a los usuarios que dependen exclusivamente de ese sistema. El análisis se realizó con base en datos bibliográficos y en un proyecto piloto situado en una propiedad rural en la ciudad de Orleans, en Santa Catarina-Brasil. Para la verificación de la correlación entre las variables, se utilizaron métodos estadísticos, evaluando la tendencia de cada parámetro de entrada del modelo. Para la generación de las ecuaciones, se aplicaron herramientas computacionales, para minimizar la distancia cuadrática entre los datos reales y los propuestos analíticamente y metas a alcanzar. Se desarrollaron tres modelos: lineal, linealizado y no lineal, a fin de verificar cuál representa mejor la realidad encontrada. Para observar la viabilidad de los mismos, se analizó la adherencia y las desviaciones locales en cada una de las situaciones. Se observó que la ecuación lineal fue la que mejor representó la realidad, uniendo el factor adherencia y simplicidad. El linealizado obtuvo problemas al distanciarse de los datos de campo. Ya el modelo no lineal fue efectivo, pero con elaboración compleja, lo que no justificó su uso.

Palabras-clave: Abastecimiento de Agua; Bombeo Fotovoltaico; Modelado

ABSTRACT

Water supply in isolated communities is one of the main challenges for the management of water resources. Due to the distant localities of the electricity grid and distribution systems, photovoltaic water pumping is one of the alternative solutions presented to guarantee the necessary water supply, so the activities of certain rural populations may proceed. Therefore, this work has the objective of elaborating a numerical model that seeks to indicate the oscillation of discharge ratio (Q/Q_P) by the radiation and total head in photovoltaic pumping systems. The creation of representative equations is necessary because the pump performance curves of the repression equipment only shows the flow variation for a given insolation, full radiation considered. The model seeks to adapt these curves to any value presented, acquiring the relation between the real flow and the flow at pump performance curve, forming what is called the discharge ratio (Q/Q_P). In this way, it is possible to minimize reservoir dimensioning errors, promoting a gain for users who rely on this system exclusively. The analysis was carried out based on bibliographic data and on a pilot project located in a rural property in the city of Orleans, in the state of Santa Catarina. To verify the correlation between the variables, statistical methods were used, evaluating the trend of each input parameter of the model. For the generation of the equations, computational tools were applied, in order to minimize the quadratic distance between the real data and those proposed analytically. Three models were developed according to their regression category: linear, linearized and nonlinear, in order to verify which represents the reality found considering a balance between adherence and simplicity. In order to observe their viability, the degree of adjustment and the local deviations in each of the situations were analyzed. It was observed that the linear regression model was the most indicated in this study, due to the low complexity and good representativeness. The linearized regression obtained problems in distancing itself from the field data, while the nonlinear regression was effective, but with a complex elaboration that did not justify its use in the first order.

Keywords: Water Supply, Photovoltaic Water Pumping, Numerical Model

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Componentes de um sistema de abastecimento de água ...	24
Figura 2: Mapa da distribuição da radiação solar global	27
Figura 3: Oscilação da radiação em um dia de junho em Xining	28
Figura 4: Esquema de rotores de uma bomba centrífuga (a), diagonal (b) e axial (c)	30
Figura 5: Representação de um sistema de bombeamento fotovoltaico.....	33
Figura 6: Oscilação horária do volume bombeado pela radiação.....	34
Figura 7: Oscilações mensal do volume bombeado pela radiação ...	35
Figura 8: Modelo de oscilação da vazão pela radiação	37
Figura 9: Modelo de oscilação da potência pela radiação	37
Figura 10: Volume bombeado e modelado durante seis dias na cidade de Orleans	38
Figura 11: Relação entre vazão e potência para diferentes alturas manométricas.....	39
Figura 12: Modelo numérico de oscilação da vazão pela radiação na cidade de Inajá.....	40
Figura 13: Variação da potência pela radiação e carga hidráulica em Gunungkidul.....	41
Figura 14: Localização do município de Orleans, no interior de Santa Catarina.....	44
Figura 15: Esquema do sistema piloto realizado na cidade de Orleans (SC).....	46
Figura 16: Disposição dos elementos do sistema piloto realizado na cidade de Orleans (SC)	46
Figura 17: Esquema da ação do driver (centro), que transfere energia do painel à bomba.....	48
Figura 18: Medidor eletromagnético de vazão usado no projeto	49
Figura 19: Piranômetro (esquerda) e <i>datalogger</i> (direita) usados para obtenção da radiação	50
Figura 20: Comportamento da vazão e radiação no Sistema 1	65
Figura 21: Comportamento da vazão e radiação no Sistema 2.....	65
Figura 22: Curvas características das bombas e do sistema	66
Figura 23: Aderência dos dados de aprendizagem ao Modelo 1	73
Figura 24: Desvios locais ordenados para o grupo de aprendizagem do Modelo 1	74
Figura 25: Aderência dos dados de teste ao Modelo 1	75
Figura 26: Desvios locais ordenados para o grupo de teste do Modelo 1	76

Figura 27: Aderência dos dados de aprendizagem ao Modelo 2.....	78
Figura 28: Desvios locais ordenados para o grupo de aprendizagem do Modelo 2.....	79
Figura 29: Aderência dos dados de teste ao Modelo 2.....	80
Figura 30: Desvios locais ordenados para o grupo de teste do Modelo 2.....	81
Figura 31: Oscilação do resíduo mínimo durante as iterações.....	84
Figura 32: Aderência dos dados de aprendizagem ao Modelo 3.....	85
Figura 33: Desvios locais ordenados para o grupo de aprendizagem do Modelo 3.....	86
Figura 34: Aderência dos dados de teste ao Modelo 3.....	87
Figura 35: Desvios locais ordenados para o grupo de teste do Modelo 3.....	88
Figura 36: Aderência dos modelos aos dados de Oyama.....	91
Figura 37: Desvios locais dos modelos aos dados de Oyama.....	92

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Caminhos da análise quali-quantitativa	56
Tabela 2: Pontos de funcionamento para os conjuntos analisados ...	67
Tabela 3: Dados estatísticos de relação de descarga e radiação	68
Tabela 4: Dados estatísticos da relação de descarga (adimensional) para os dois tipos de poço	69
Tabela 5: Distribuição das medições para o Sistema 1A	71
Tabela 6: Distribuição das medições para o Sistema 1B	71
Tabela 7: Distribuição das medições para o Sistema 2A	71
Tabela 8: Distribuição das medições para o Sistema 2B	71
Tabela 9: Valores iniciais dos coeficientes para as iterações	82
Tabela 10: Valores iniciais após a interpolação	83
Tabela 11: Resumo dos modelos apresentados	89
Tabela 12: Aplicação dos modelos no trabalho de Zanirato, Moura e Cordeiro (2011)	90
Tabela 13: Aplicação dos modelos no trabalho de Oyama (2008) ...	92

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	19
2. OBJETIVOS.....	21
2.1. OBJETIVO PRINCIPAL	21
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	21
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	22
3.1. ABASTECIMENTO DE ÁGUA	23
3.2. ENERGIA SOLAR	26
3.3. BOMBEAMENTO FOTOVOLTAICO.....	29
3.3.1. <i>Histórico do bombeamento fotovoltaico.....</i>	<i>31</i>
3.3.2. <i>Estrutura de um sistema de bombeamento fotovoltaico</i>	<i>32</i>
3.3.3. <i>Influência da radiação no bombeamento fotovoltaico</i>	<i>34</i>
3.4. SISTEMAS DE MODELAGEM EM UM BOMBEAMENTO FOTOVOLTAICO	36
3.5. RESUMO CONCLUSIVO.....	42
4. MATERIAIS E MÉTODOS	44
4.1. ÁREA DE CARACTERIZAÇÃO	44
4.2. SISTEMA PILOTO.....	45
4.2.1. <i>Equipamentos</i>	<i>47</i>
4.3. OBTENÇÃO DOS PARÂMETROS DO MODELO	50
4.3.1. <i>Tratamento dos dados coletados.....</i>	<i>50</i>
4.3.2. <i>Construção das curvas características.....</i>	<i>51</i>
4.4. ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS DADOS DE CAMPO.....	53
4.4.1. <i>Análise quanti-quantitativa</i>	<i>54</i>
4.4.2. <i>Análise quali-quantitativa.....</i>	<i>56</i>
4.5. SEGREGAÇÃO DOS DADOS PARA A MODELAGEM	57
4.6. MODELAGEM DA RELAÇÃO DE DESCARGA	58
4.6.1. <i>Regressão linear.....</i>	<i>58</i>

4.6.2. <i>Regressão linearizada</i>	59
4.6.3. <i>Regressão não-linear</i>	61
4.6.4. <i>Verificação da eficácia dos modelos</i>	63
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	64
5.1. COLETA E TRATAMENTO DOS DADOS DE CAMPO	64
5.2. DETERMINAÇÃO DA ALTURA MANOMÉTRICA E DA VAZÃO PLENA	66
5.3. ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS DADOS DE CAMPO.....	67
5.3.1. <i>Análise da correlação entre relação de descarga e radiação</i>	68
5.3.2. <i>Análise da correlação entre relação de descarga e altura manométrica</i>	69
5.4. SEGREGAÇÃO DOS DADOS PARA MODELAGEM	70
5.5. MODELAGEM NUMÉRICA	72
5.5.1. <i>Regressão linear</i>	72
5.5.2. <i>Regressão linearizada</i>	77
5.5.3. <i>Regressão não linear</i>	82
5.5.4. <i>Análise comparativa dos modelos</i>	88
5.6. APLICAÇÃO DOS MODELOS.....	90
5.6.1. <i>Primeiro teste</i>	90
5.6.2. <i>Segundo teste</i>	91
6. CONCLUSÕES	93
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	95
ANEXO A – Caracterização técnica da bomba	101
APÊNDICE A – Dados diários para o Sistema 1	102
APÊNDICE B – Dados diários para o Sistema 2	108
APÊNDICE C – Dados finais do modelo para aprendizagem	112
APÊNDICE D – Dados finais do modelo para teste	117

1. INTRODUÇÃO

A água é um recurso essencial para o desenvolvimento e manutenção da sociedade, presente em diversas atividades como alimentação, irrigação, transporte, higiene, produção de energia, agricultura (TSUTIYA, 2013). Portanto, o abastecimento adequado desse componente é um dos motores fundamentais de uma comunidade estruturada, garantindo um consumo universal de qualidade e quantidade para a população (BRASIL, 1997). Certos povoados isolados e rurais não têm acesso a serviços adequados de fornecimento de água potável, por estarem distantes de estações de tratamento e de redes de energia elétrica. Pode-se citar a Ilha de Caiapós, no Norte de Minas Gerais (BOITRAGO ET AL, 2016); pequenos vilarejos familiares no interior da Amazônia (SEVERINO, 2008); ou inclusive pontos fora do Brasil, como o Purwodadi Village, em região montanhosa na Indonésia (SETIAWAN ET AL., 2014). No exterior, há países com deficiências energéticas, devido à ausência de combustíveis fósseis, como o Chile, promovendo dificuldades de abastecimento (SEGUEL, 2009). Regiões do Brasil e de outros países em desenvolvimento ou subdesenvolvidos apresentam localidades isoladas espalhadas por todo o território, deficitárias e que necessitam de atenção.

Uma das soluções para amenizar o problema da carência de uma rede de distribuição nas comunidades isoladas é o abastecimento individual por meio da captação de água subterrânea, permitindo uma reserva própria desse recurso. Em paralelo, para suprir a falta de energia para o bombeamento da água para um reservatório superior ou para os demais cômodos de uma residência, surge como alternativa o bombeamento fotovoltaico (CARVALHO, 2016). A partir do uso de energias solares, o custo com redes elétricas se torna menos elevado, garantindo o suprimento adequado dos recursos hídricos.

As variações diárias de radiação são relevantes no dimensionamento de sistemas fotovoltaicos de bombeamento. A curva característica da bomba (CCB) que opera com energia fotovoltaica fornece a oscilação da vazão pela altura manométrica para uma condição padrão de radiação incidente de 1000 W/m^2 , considerada no presente trabalho como vazão plena (Q_p) (NIEDZIALKOSKI ET AL., 2012). A vazão real recalçada (Q) varia de acordo com as condições de radiação ao longo dos dias e com as estações do ano (SANTOS, MICHELS; GNOATTO, 2010). Sendo assim, é necessário o enten-

dimento das relações, com a finalidade de promover um dimensionamento adequando de um sistema de bombeamento fotovoltaico.

A carga hidráulica é outro fator influente no dimensionamento de sistemas de bombeamento fotovoltaico (SETIAWAN ET AL.,2014). O aumento da altura manométrica promove um acréscimo na energia necessária para o recalque e, portanto, uma diminuição no volume bombeado.

Os modelos desenvolvidos relacionados ao bombeamento fotovoltaico indicam, por balanço energético ou métodos estatísticos, o volume final bombeado em função da radiação (CARVALHO, 2016). O presente trabalho busca, alternativamente às metodologias utilizadas, a criação de um modelo numérico de determinação da relação de descarga, isto é a razão entre a vazão real recalçada e vazão plena (Q/Q_p). Os dados de entrada são compostos apenas pela radiação e altura manométrica.

A elaboração de um modelo de determinação da relação de descarga tem como finalidade facilitar o dimensionamento de sistemas de abastecimento baseados em bombeamento fotovoltaico. Portanto, promove-se uma construção adequada de reservatórios de armazenamento, minimizando os erros. Deve-se ter cautela, contudo, na utilização da modelagem, pois os modelos não são a realidade em si, apenas a representam, buscando a maior semelhança possível.

A criação do modelo tem como justificativa garantir que os sistemas de abastecimento de água com bombeamento fotovoltaico funcionem adequadamente. Ao utilizar a CCB, subestima-se o volume final de reservatórios de armazenamento, tendo em vista que se espera uma descarga bombeada mais elevada. Por conseguinte, os erros podem acarretar em desabastecimento. Como em sistemas isolados, há uma dificuldade de ligação à rede de distribuição, a escassez de água é uma questão relevante, que deve ser evitada, sobretudo. Com as soluções adequadas, várias comunidades isoladas poderão ser beneficiadas, minimizando os erros e gerando um sistema funcional.

Observando a necessidade da elaboração de um modelo, este trabalho foi realizado analisando dados de radiação, vazão e altura manométrica de um sistema piloto construído no município de Orleans, em Santa Catarina, em uma comunidade rural. O projeto é financiado pela Fundação Nacional da Saúde (Funasa), e avalia a viabilidade de um sistema fotovoltaico e a captação de água subterrânea por meio de uma técnica de tratamento conhecida como filtração em margem.

O sistema piloto foi projetado em uma propriedade particular, contendo basicamente um poço tubular profundo e um escavado; um conjunto motobomba movido por painéis fotovoltaicos e um reservatório elevado. A água é retirada de um curso d'água adjacente à propriedade, filtrada por meio do solo em direção a um dos poços, onde ocorre o bombeamento para um reservatório elevado, destinado ao abastecimento da propriedade.

As medições foram realizadas de abril de 2015 a dezembro de 2017, obtendo-se dados de vazão e radiação. Foram analisadas as curvas características das bombas (CCB), a fim de determinar a vazão plena e, posteriormente, a relação de descarga.

Os dados obtidos no período de análise foram compilados e segregados para as duas etapas do projeto, compreendendo dois sistemas distintos. A elaboração dos modelos foi feita com um uma nova segregação, formando um grupo para aprendizagem, de geração das equações; e outro para teste, de aplicação. Para a geração do modelo, foram usadas ferramentas computacionais, minimizando a diferença quadrática entre os parâmetros. Após a construção de equações preliminares, foi necessária uma verificação da aderência do modelo criado com os dados reais, utilizando o coeficiente de determinação (R^2) e a análise dos desvios locais.

As regressões consistiram em três equações: um modelo linear, um linearizado e um não linear. Além da análise individualizada, compararam-se os modelos, com a finalidade da adoção do mais adequado para representar a realidade. Por fim, buscou-se a eficácia de expansão, aplicando os resultados em outros trabalhos desenvolvidos.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO PRINCIPAL

O presente trabalho tem como objetivo principal compor um modelo numérico de descrição da oscilação da relação de descarga com a radiação solar global e com a altura manométrica, em um sistema de bombeamento fotovoltaico.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

O presente trabalho tem os seguintes objetivos específicos:

- a. Identificar as relações existentes entre vazão, radiação e altura manométrica e possíveis fatores que afetam essas relações, em um sistema de bombeamento fotovoltaico;
- b. Caracterizar o dimensionamento de sistemas de abastecimento de água que utilizam bombeamento fotovoltaico com acoplamento direto;
- c. Verificar a aderência de volumes diários de água obtidos em experimentos de bombeamento fotovoltaico, aos volumes preditos pelo modelo proposto.

Hipótese: A descarga fornecida por um sistema de bombeamento fotovoltaico pode ser estimada por meio de um modelo construído a partir de dados observados em sistemas experimentais.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A modelagem de um sistema de abastecimento de água por bombeamento fotovoltaico busca uma representação aproximada da realidade, com o objetivo de minimizar erros de dimensionamento.

Nesta seção, serão discutidos o próprio abastecimento de água, a energia solar, a sua aplicação no bombeamento fotovoltaico e, por fim, sobre os modelos numéricos e hidráulicos já desenvolvidos sobre o assunto.

No primeiro tema, serão abordados alguns conceitos e trabalhos referentes ao próprio abastecimento de água. Será apresentado um histórico, com as primeiras tecnologias utilizadas e os avanços obtidos; além da estrutura de um sistema convencional. Serão observadas as alternativas, com foco nas soluções para suprir as necessidades de comunidades isoladas e rurais, a base do modelo. A partir disso, haverá uma discussão com alguns trabalhos baseados no uso de captação de água subterrânea, tratamento por filtração em margem e a possibilidade da aplicação de energia solar como força motriz do sistema.

No segundo tópico, a energia fotovoltaica será trabalhada com maior detalhamento, observando o histórico, avanços relativos e a aplicação da tecnologia fotovoltaica no bombeamento de água, o foco do trabalho. Será discutido o comportamento da incidência solar no planeta, verificando sua distribuição geográfica e dispersão horária, valendo-se ater ao conceito de horas de sol pleno. O conhecimento dessa variação é de fundamentação importância na elaboração do modelo, baseado na oscilação da vazão pela radiação.

Na terceira parte, o bombeamento fotovoltaico será aprofundado, com a classificação das bombas, visando à introdução do conceito de bomba vibratória, utilizada nos modelos. Será apresentado um balanço geral do uso das tecnologias fotovoltaicas no decorrer das últimas décadas, observando como o processo foi se tornando mais viável ao longo dos anos, justificando o seu uso. Nesta etapa, será relatada a estrutura básica desse sistema, suas particularidades, vantagens e desvantagens. Por fim, para introduzir a necessidade da criação de um modelo, serão mostrados alguns resultados de outros trabalhos que verificaram a oscilação da vazão em função da radiação.

Na última etapa, será encerrada a revisão bibliográfica com um foco em trabalhos que desenvolveram modelos hidráulicos e numéricos referentes à variação da vazão pela radiação. Serão observadas a aderência desses modelos, suas possibilidades de aplicação e a presença de mais variáveis no processo, como a altura manométrica.

3.1. ABASTECIMENTO DE ÁGUA

O abastecimento de água para consumo humano constitui uma atividade essencial para a articulação das comunidades, desde os primórdios da história, quando o homem abandonou o nomadismo. As principais civilizações da antiguidade se desenvolveram no entorno de rios, utilizando os recursos hídricos na produção de alimentos, criação de animais, suprimento da própria população, irrigação e transporte.

Os processos de abastecimento trazem alguns registros relevantes durante a história. Em Knossos, na ilha de Creta, por volta de 1.600 A.C., foi desenvolvido um complexo de distribuição de água a partir de tubulações circulares e pressurizadas. Na Turquia, podem-se observar as ruínas da região de Anatólia, com estruturas hidráulicas datadas entre 2.000 A.C. e 200 A.C.; que incluem canais, sifões, aquedutos, reservatórios e barragens. Mundialmente conhecidos, os aquedutos romanos foram componentes marcantes no início do Século I. Durante os séculos seguintes, houve diversos avanços no abastecimento público, como preocupação com a higiene, mudança nas tubulações, criação de sistemas mais complexos, dentre outros fatores. No Brasil, os primeiros registros de estruturas públicas datam do Século XIX (TSUTIYA, 2013).

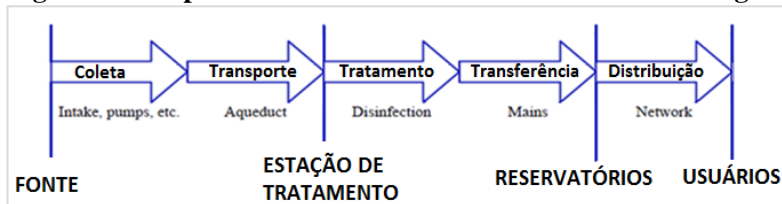
Atualmente, os sistemas de distribuição de água devem promover um abastecimento com qualidade e quantidade suficiente para suprir as necessidades das comunidades abastecidas (NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 2005). No entanto, em alguns locais do planeta, a disponibilidade de recursos hídricos é um fator crítico, devido a diversos conflitos e a escassez de água. No próprio Brasil, em regiões semiáridas como as do interior do Nordeste, há dificuldades na captação e transporte hídrico (FRAIDENRAICH; VILELA, 1999).

O abastecimento de pequenas comunidades rurais, na maioria vezes isoladas, é um desafio para o gerenciamento de recursos hídricos, muitas vezes apresentando um custo extremamente elevado, principalmente em épocas de seca. A dificuldade de se obter acesso à rede elétrica nessas áreas torna o bombeamento de água caro e inacessível. (SETIAWAN ET AL., 2014). É necessário, portanto, a busca de alternativas ou soluções para minimizar esses valores, promovendo a obtenção e aplicação de tecnologias inovadoras e simples, que permitam garantir os direitos irrefutáveis dessas populações. Dentre elas, pode-se citar a captação de água subterrânea, por meio da filtração em margem e o uso de bombeamento fotovoltaico (CARVALHO, 2016).

Os sistemas de abastecimento de água, incluem o corpo hídrico, a captação de água, estações elevatórias, condução por meio das tubulações de adução, tratamento de água com estações, armazenamento por meio de reservatórios, distribuição pelas redes e o próprio consumo (DJURIN; MARGETA; GLASNOVIC, 2011).

A estrutura de um sistema de abastecimento de água, bem como seus componentes, está esquematizada na Figura 1:

Figura 1: Componentes de um sistema de abastecimento de água



Fonte: Adaptado de Djurin, Margeta e Glasnovic (2011).

Ao se pensar em pequenas comunidades, distantes das estações de tratamento de água, pode-se avaliar a adoção de sistemas de

captação por água subterrânea. Estimava-se que, em 2003, no Brasil, três milhões de usuários usufruíam do consumo por meio de mais de mil poços espalhados no país (TSUTIYA, 2013). Baruah (2009) defende que esse sistema é vantajoso em relação ao uso de águas superficiais devido a uma melhor qualidade e uma maior proteção contra a poluição de mananciais.

A utilização de mananciais subterrâneos exige uma avaliação de qualidade e uma análise hidrossedimentológica. Fraidenraich e Vilela (1999) dissertam que a composição química e biológica depende do ambiente geológico de armazenamento. Os autores avaliaram a qualidade da água subterrânea no sertão de Pernambuco em dois pontos, verificando que, por ser um solo cristalino, há grande quantidade de cloro e de sólidos totais dissolvidos, o que prejudicaria o seu uso. Foi verificado que solos de origem sedimentar, por serem moles, seriam mais adequados para a captação, sendo menos sulfatadas, cloradas, com características neutras ou alcalinas.

Baruah (2009) fez uma análise do abastecimento de água na cidade de Guwahati, na Índia, onde há uma grande utilização de água subterrânea em paralelo com o desenvolvimento de um sistema de abastecimento público. O autor analisou a qualidade da água dos poços e da rede, tanto em épocas de cheias quanto de secas. Foi verificado que o sistema coletivo apresentou déficit de qualidade e quantidade, sendo inadequado. Quanto aos mananciais subterrâneos, houve problemas de disponibilidade, principalmente na época de escassez, necessitando de uma regularização e estruturação do sistema. A análise química da água apresentou elementos de risco, como acidez e diversos cátions, o que implicaria na necessidade de um tratamento, ainda que básico, após a adoção do processo.

Uma das formas de tratamento de água que podem ser utilizadas para pequenas comunidades isoladas é a filtração em margem. Esse processo consiste na indução de um gradiente hidráulico, transportando a água de um corpo hídrico a um poço construído nas margens do manancial. Dessa maneira, as partículas do solo funcionam como material filtrante, promovendo a eliminação de impurezas e a remoção de certos microrganismos (MONDARDO, 2009). A autora analisou a viabilidade e a qualidade desse processo de remoção, avaliando a qualidade da água captada na Lagoa do Peri, em Florianópolis, Santa Catarina. No estudo, utilizou-se o sistema como tratamento preliminar para a retenção de cianobactérias e toxinas, a montante da filtração direta. Foi verificada uma remoção pratica-

mente total desses componentes e um aumento da carreira de filtração em três a quatro vezes.

Pensando-se na minimização dos custos, há alternativas também quanto à energia utilizada no sistema de abastecimento de água, como já foi citado. A partir disso, podem-se avaliar formas de energia renovável, como a radiação solar, que será discutida na próxima sessão.

3.2. ENERGIA SOLAR

O avanço industrial nos últimos séculos promoveu uma elevação exponencial na demanda energética. A explosão tecnológica, que se iniciou principalmente nos anos 90, com a popularização dos computadores pessoais e, recentemente, dos *smartphones*; acarretou em um consumo ainda mais elevado de energia. Mediante a essa situação, as fontes alternativas surgem com intensidade em diversos países, de forma a frear a grande utilização de recursos naturais.

Dentre as alternativas energéticas, pode-se citar aquela proveniente da radiação solar. O sol é uma fonte ilimitada de energia, promovendo uma quantidade suficiente e renovável para o abastecimento humano. O uso de uma tecnologia que aproveite esse recurso pode ser uma solução viável para locais afastados, carentes de energia elétrica devido à distância e ao custo elevado (SANTOS, MICHELS; GNOATTO, 2010).

O uso de energia solar tem seus primeiros registros no século XVII, com a criação de uma máquina de recalque de água, baseada na expansão do ar devido à radiação. As tecnologias foram avançando no século XIX, com as células solares, que foram usadas inclusive para alimentar uma transmissão de rádio espacial, em 1958. A partir da década de 70, os módulos fotovoltaicos começaram a ser aplicados mais efetivamente no bombeamento de água para abastecimento. (FRAIDENRAICH; VILELA, 1999).

Para o entendimento das tecnologias envolvendo a energia solar, é necessário a compreensão do comportamento da radiação no planeta.

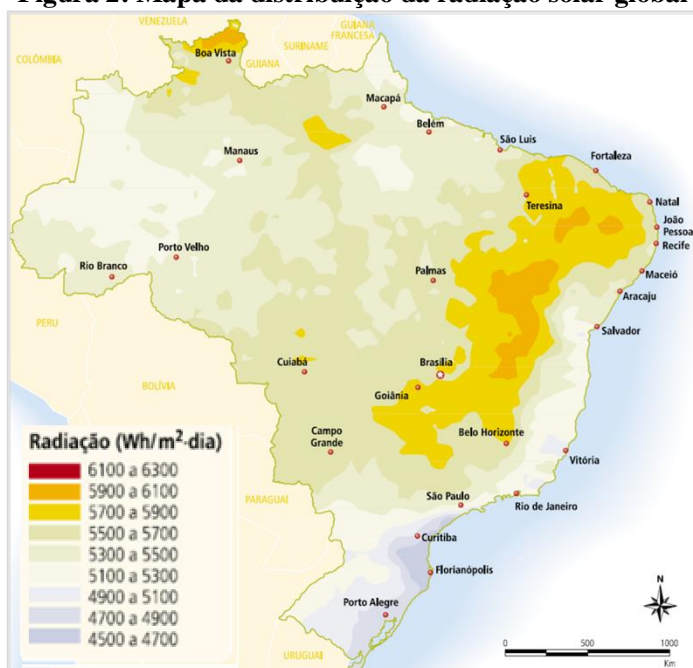
A radiação solar se propaga na atmosfera e incide na superfície terrestre, promovendo dois tipos de processo: absorção e espalhamento. No último, a energia é irradiada de maneira direta e difusa, sendo a soma delas a irradiação solar global (PEREIRA et al., 2010). As tecnologias fotovoltaicas captam essa energia, utilizando-as para os fins desejados. Por conseguinte, para avaliar a viabilidade

de aplicação de processos fotovoltaicos, é necessário o entendimento da distribuição da incidência solar pelo globo terrestre e verificar as áreas mais adequadas.

Para a medição da radiação solar global, é necessária a utilização de um aparelho denominado piranômetro. Guimarães (2003) o decreve como um instrumento que apresenta um sensor de irradiação por meio de uma pilha termoeletrica. Quando há uma alternância de temperatura, há a geração de uma tensão elétrica nessa pilha, com uma relação diretamente proporcional. O piranômetro faz, no fim, uma relação entre essa diferença de potencia com o nível de radiação incidente, sendo, portanto um medidor indireto.

O mapa a seguir (Figura 2) traz um balanço da radiação solar global diária no Brasil, mostrando as regiões de maior potencial energético nessa tecnologia.

Figura 2: Mapa da distribuição da radiação solar global



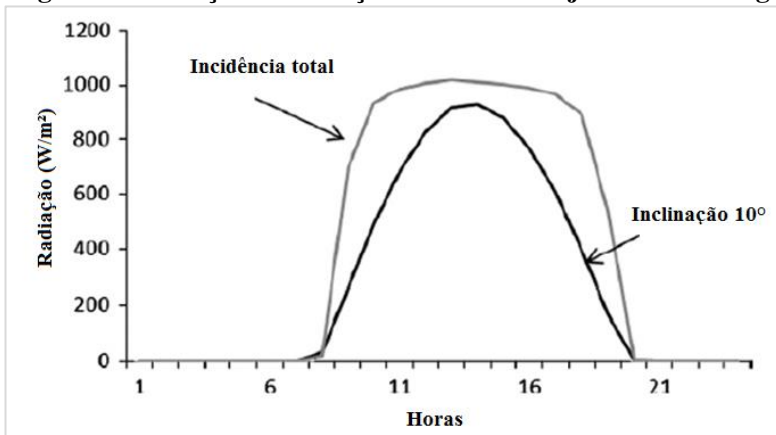
Fonte: Adaptado de Atlas de Energia Elétrica no Brasil, ANEEL (2005).

Observando a Figura 2, pode-se verificar um grande potencial energético solar na região nordeste, principalmente no estado da Bahia e Ceará. No Sul, essa tecnologia deve ser utilizada com cautela, após uma análise meticulosa de sua viabilidade econômica.

Além da variação diária no decorrer do ano, a radiação solar sofre oscilações horárias. Campana, Li e Yan (2013) verificaram a variação da insolação em um dia ensolarado de junho na cidade de Xining, na China, em uma região semiárida.

O resultado da análise da insolação se encontra na Figura 3:

Figura 3: Oscilação da radiação em um dia de junho em Xining



Fonte: Adaptado de Campana, Li e Yan (2013).

Os autores observaram um comportamento aproximadamente parabólico, cuja irradiação registrada ocorria aproximadamente entre as sete da manhã e sete e meia da noite, com pico por volta das 13h. Esse comportamento é natural, já que, na metade do dia, a incidência solar está mais próxima de um ângulo perpendicular, aumentando sua intensidade.

Observando a Figura 3, pode-se verificar que, em dadas horas do dia, a insolação é inferior a 300 W/m². Nesses casos, verifica-se que não há uma incidência efetiva capaz de promover um bombeamento fotovoltaico. Dessa forma, o número de horas efetivo de sol (N_{sol}) deve ser analisado considerando esse encurtamento (DALSSASSO, 2017).

Para verificar a viabilidade do bombeamento, é necessária uma análise do comportamento horário da incidência solar. A ener-

gia recebida deve ser suficiente para prover o funcionamento tanto na presença, quanto na ausência de radiação. Para efeitos de energia fotovoltaica, vale-se ater ao conceito de horas de sol pleno. Marques et al. (2012) descrevem esse parâmetro como o tempo em horas com radiação de 1000 W/m^2 , equivalente à soma da incidência total diária. Soares et al. (2011) discorrem o conceito como uma relação entre a radiação solar média que incide sobre os planos dos painéis fotovoltaicos e a radiação plena, considerada 1 kW/m^2 .

A determinação do número de horas de sol pleno é de extrema relevância na análise de sistemas de bombeamento fotovoltaico, pois há necessidade de bombeamento também durante o período noturno, quando há consumo de água sem radiação. Dessa maneira, a quantidade de água bombeada durante o dia deve ser suficiente para promover o suprimento da demanda total diária.

Os projetos e peculiaridades do sistema de bombeamento fotovoltaico serão discutidos na sequência.

3.3. BOMBEAMENTO FOTOVOLTAICO

Um sistema fotovoltaico é uma estrutura que utiliza módulos fotovoltaicos de forma a captar a energia solar e convertê-la em elétrica. Aplicado ao bombeamento de água, o procedimento é equivalente, com a energia resultante sendo utilizada para impulsionar o escoamento, dando-lhe a carga necessária para vencer as perdas energéticas.

Ghoneim (2006) discorre uma tecnologia fotovoltaica como aquela em que a radiação solar é convertida de forma a gerar corrente elétrica, de forma silenciosa e limpa. Para o bombeamento de água, é um sistema que promove uma relação entre a disponibilidade de energia solar com a quantidade de água requerida, usando o sol como fonte de recalque. Abu-Aligah (2011) simplifica, descrevendo-o apenas como um sistema hidráulico que utiliza a potência da radiação solar como fonte energética.

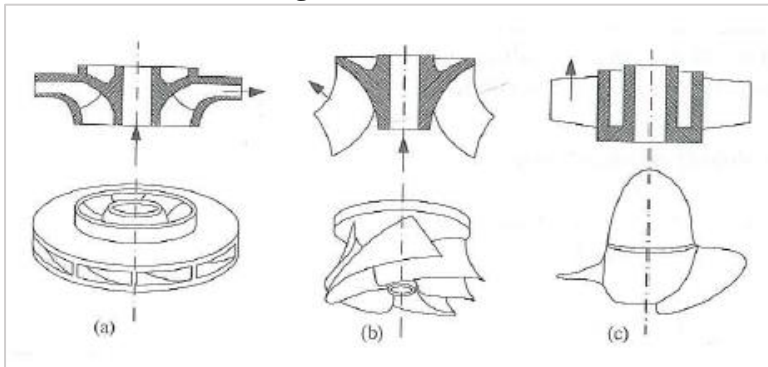
Para uma compreensão mais aprofundada de um sistema de bombeamento fotovoltaico, é necessário classificar os tipos de bombas e verificar o respectivo comportamento do escoamento. Dessa maneira, é possível estimar, com mais facilidade, como ocorrerão as perdas internas e as mudanças no rendimento.

Segundo Porto (2006), há três tipos de bombas relacionadas à trajetória do líquido:

- **Bombas centrífugas ou de escoamento radial:** a força centrífuga é o motor do escoamento, fazendo com que o líquido saia radialmente pela periferia, podendo vencer grandes cargas.
- **Bombas de escoamento misto ou diagonal:** o impulso hidráulico é originário tanto da força centrífuga quanto da sucção das pás, promovendo uma saída na direção radial. São recomendadas para cargas medianas.
- **Bombas de escoamento axial:** a sucção das pás promove um movimento helicoidal, que permite a saída do líquido em direção praticamente axial. Utilizadas quando as vazões são elevadas e as cargas reduzidas.

Os tipos de rotores das bombas estão esquematizados na Figura 4:

Figura 4: Esquema de rotores de uma bomba centrífuga (a), diagonal (b) e axial (c)



Fonte: Porto (2006).

Tsutiya (2013) classifica as bombas em dois grandes tipos: cinética e deslocamento positivo. Na cinética, as quais encontram-se as bombas centrífugas, o aumento de pressão do líquido é obtido por meio da geração de energia mecânica pela aceleração dos componentes do equipamento, como a movimentação de pás. Assim, ocorre a transferência de energia para o líquido sob a forma de pressão. Já as de deslocamento positivo não possuem trocas energéticas, dando a água em posição estática uma elevação de pressão, originando um escoamento para outra posição estática.

Dentre as bombas de deslocamento positivo, vale destacar as vibratórias, utilizadas para pequenos abastecimentos. Segundo Nesbit (2006), o funcionamento desse equipamento é por meio de válvulas, que impulsionam o líquido para o topo, não havendo a utilização da velocidade para o recalque e sim uma diferença de pressão.

Ramos (2008) caracteriza as bombas vibratórias pela utilização de um sistema de diafragma de borracha movido por tensões elétricas, com a finalidade de promover o deslocamento da coluna d'água. Portanto, o equipamento funciona pela diferença de potencial aplicada e não pela velocidade ou pela corrente gerada. Uma das vantagens desse sistema é que, devido à falta de dependência da energia cinética, o mesmo pode funcionar com vazões baixas. Para bombas solares, essa vantagem permite o recalque s mesmo em dias de radiação diminuta, desde que não seja nula.

Com relação às perdas de carga, as bombas de deslocamento positivo em geral apresentam pouca oscilação na vazão devido às perdas a jusante. Esse fator pode influenciar em possíveis modelos futuros que consideram a altura manométrica como dado de entrada para a modelagem (CARVALHO, 2006).

Dal Bem et al. (2016) destacam que a adoção de bombas vibratórias apresenta vantagens, como ausência de manutenção contínua, baixo custo de fabricação, suporte a grandes alturas manométricas e possuir poucas partes móveis. Dessa maneira, a utilização desse tipo de equipamento impulsionou o uso de bombeamento fotovoltaico, que passou por diversas etapas no Brasil e no mundo.

3.3.1. Histórico do bombeamento fotovoltaico

Segundo Andrade, Bezerra e Antunes (2008), a tecnologia fotovoltaica aplicada para bombeamento teve início em 1977 pelo mundo. No Brasil, os registros datam o início dos anos 1980, com a aplicação voltada para o atendimento de pequenas comunidades. Até o final da década de 2000, no entanto, a maior parte das estações e módulos foi desativada. Os autores creditam essa diminuição do uso à falta de aparatos nacionais, o que acabou elevando o custo e manutenção dos existentes; o desinteresse e despreparo da população; além dos benefícios que as comunidades recebem com a instalação de uma rede elétrica completa.

O uso do bombeamento fotovoltaico só se popularizou décadas após seu surgimento, com a entrada no século XXI. Estimava-se que, no início da década de 1990, estavam instalados aproximada-

mente de 10 mil sistemas pelo mundo (FEDRIZZI; SAUER, 2002). Em 2009, já eram registrados com 3.300 módulos no Brasil e 7 mil só na Índia. (FEDRIZZI; RIBEIRO; ZILLES, 2009).

A redução dos custos acabou sendo um dos principais motivos para a difusão mundial. Fraidenraich e Vilela (1999) elaboraram um estudo sobre o avanço da tecnologia nas três últimas décadas do século XX e observaram uma queda de 75% nos preços dos módulos e um aumento mais de duas vezes maior na eficiência máxima, chegando a 5%.

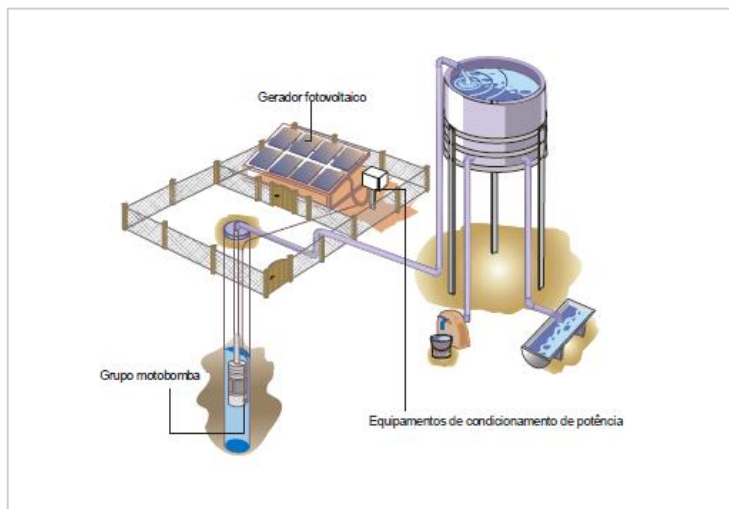
Atualmente, o sistema de bombeamento fotovoltaico apresenta diversas vantagens em relação aos convencionais elétricos. A tecnologia possui custos operacionais mais reduzidos, baixa manutenção, longo período de funcionamento e fácil instalação (ABU-ALIGAH, 2011). O autor elaborou uma comparação de custos entre o processo de bombeamento solar e um sistema a diesel, verificando a pior e a melhor situação para os módulos fotovoltaicos. Foi concluído que, apesar do investimento inicial mais de seis vezes maior, utilizar o sol como fonte renovável promove uma economia de 75% a 90% no valor total, devido à baixa manutenção. As desvantagens se relacionariam à necessidade de armazenamento de água em períodos nublados e à disponibilidade de um capital alto para a instalação dos aparelhos.

3.3.2. Estrutura de um sistema de bombeamento fotovoltaico

Um sistema de bombeamento fotovoltaico é composto por três conjuntos de elementos básicos. O gerador fotovoltaico, constituído por painéis de captação da radiação, é o responsável pela conversão da energia solar em elétrica, garantindo o funcionamento do sistema. Os mecanismos de condicionamento de potência são formados pelo inversor, controlador e seguidor do ponto máximo de potência. Por fim, o conjunto moto bomba é o componente que impulsiona o escoamento e o reservatório o que promove o armazenamento de água e da carga hidráulica (FEDRIZZI; RIBEIRO; ZILLES, 2009).

A Figura 5 representa um esquema simplificado do abastecimento de água por meio de um complexo fotovoltaico:

Figura 5: Representação de um sistema de bombeamento fotovoltaico



Fonte: Fedrizzi, Ribeiro e Zilles (2009).

A tecnologia de bombeamento fotovoltaico normalmente funciona de forma autossuficiente, isto é, apenas com a energia solar, sem ligação com a rede elétrica ou uso de baterias. Esse sistema se caracteriza como bombeamento por acoplamento direto, que dispensa o uso de equipamentos de armazenamento de energia, como conversores eletrônicos ou banco de baterias (SANTOS; MICHELS; GNOATTO, 2010). O próprio reservatório é dimensionado para garantir dias de autonomia, considerando o volume diário bombeado (CARVALHO, 2016).

O driver, ou unidade de controle, é o responsável por fornecer à bomba a energia elétrica necessária dos painéis para o equipamento e controlar a vazão que será bombeada, conforme a oscilação de radiação durante o dia (CARVALHO, 2016). Com isso, quando a insolação é relativamente baixa, o driver automaticamente é programado para enviar uma descarga menos elevada, garantindo a continuidade do sistema.

O dimensionamento de um sistema fotovoltaico deve ser calculado de forma com que a energia solar captada seja suficiente para garantir a demanda elétrica requerida pelo sistema. O gerador fotovoltaico depende extremamente da irradiação solar e sensivelmente da temperatura dos módulos. Para tal, deve-se verificar, portanto, o

número de horas de sol pleno, como já foi discutido anteriormente. Esse parâmetro é calculado pela razão entre a irradiação total diária e a máxima potência de 1 kW/m² (PINHO; GALDINO, 2014).

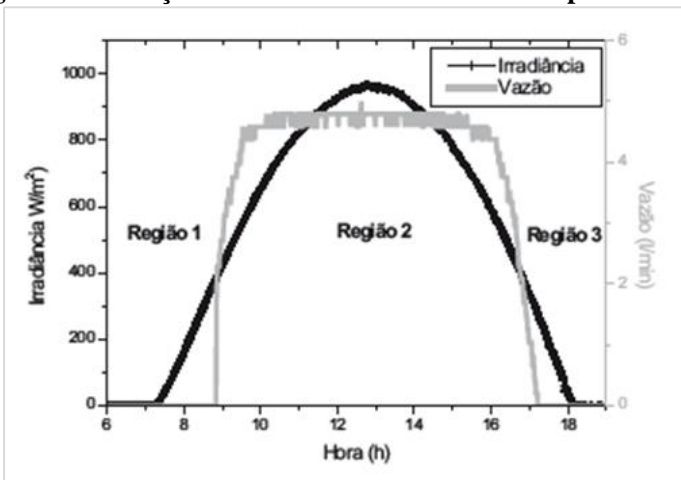
3.3.3. Influência da radiação no bombeamento fotovoltaico

As tecnologias relacionadas com o dimensionamento de um sistema fotovoltaico, incluindo todos os seus elementos, devem levar em conta a força-motriz principal que garante o seu funcionamento: a incidência de radiação solar. A energia captada pelos módulos se altera em função da insolação diária e horária, acarretando em uma oscilação na potência do conjunto e, por conseguinte, no bombeamento de água. Portanto, as curvas características das bombas apresentadas pelos fornecedores podem não refletir a situação real, devendo se adaptar os processos e verificar uma relação adequada.

Santos, Michels e Gnoatto (2010) analisaram um sistema de bombeamento fotovoltaico por acoplamento direto, construído na cidade de Medianeira, no Paraná. Como não há fornecimento de energia além dos painéis, nem armazenamento, os autores verificaram uma dependência direta do bombeamento com a insolação.

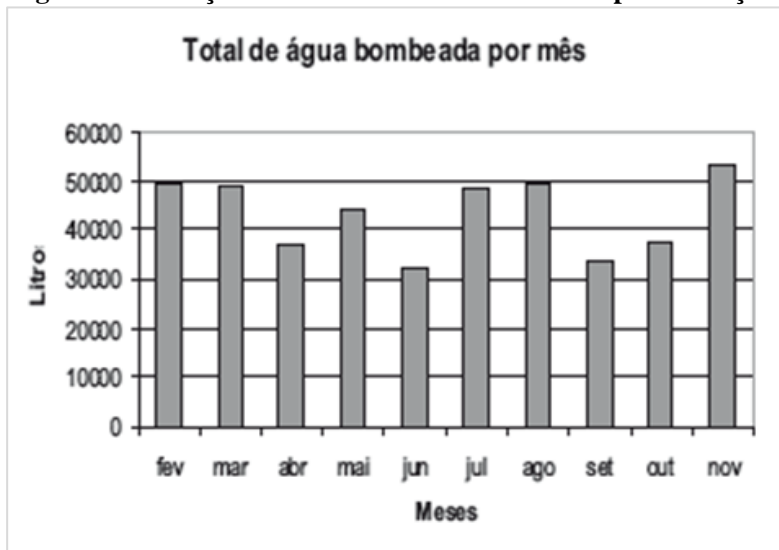
Os resultados da pesquisa estão representados na Figura 6 e na Figura 7:

Figura 6: Oscilação horária do volume bombeado pela radiação



Fonte: Santos, Michels e Gnoatto (2010).

Figura 7: Oscilações mensal do volume bombeado pela radiação



Fonte: Santos, Michels e Gnoatto (2010).

Como pode ser observado na Figura 6, nas horas do dia em que não há presença do sol, a quantidade de de água recalçada é nula. No período onde há irradiação, o volume apresenta uma oscilação acompanhando a energia captada. Na Figura 7, os autores concluíram que, de fato, nos meses mais frios, a potência do conjunto é menor e, portanto, há uma vazão de recalque inferior.

Campana, Li e Yan (2013) elaboraram um piloto de dois sistemas de bombeamento fotovoltaico, também por acoplamento direto, sendo um fixo e outro móvel. A utilização desse complexo acoplado simplifica a análise, pois não há armazenamento de energia, tendo a vazão de recalque diretamente ligada à radiação. Foi observado que, para os dois casos, o volume bombeado acompanha a curva de radiação, tanto em uma análise diária quanto em uma mensal. Por consequência, há mais um forte indício da influência da insolação no volume bombeado.

Levando em conta os diversos fatores apresentados que contribuem para a oscilação da vazão com relação à radiação, a descrição desse comportamento por meio da criação de modelos é relevante para um correto dimensionamento de sistemas fotovoltaicos. Essa

modelagem, bem como exemplos relacionados, será discutida e analisada em sequência.

3.4. SISTEMAS DE MODELAGEM EM UM BOMBEAMENTO FOTOVOLTAICO

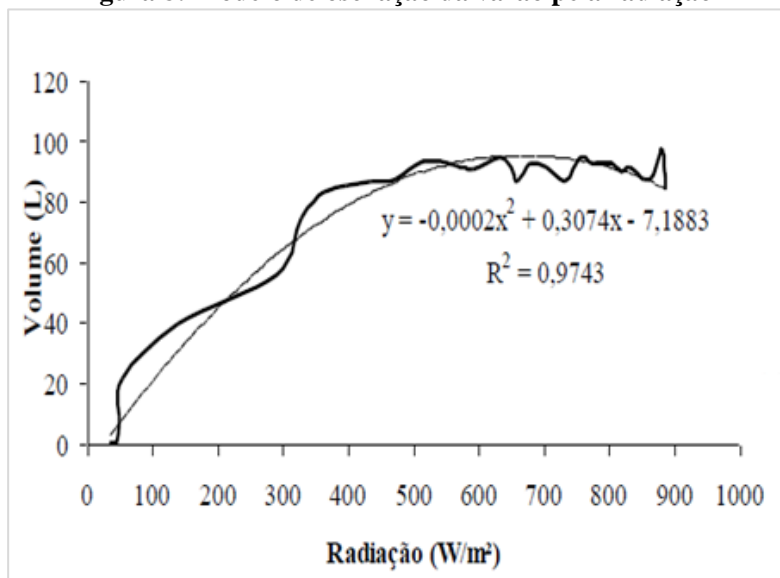
Para um dimensionamento adequado de um sistema fotovoltaico, muitos autores recorrem a modelos baseados em dados experimentais, denominados modelos estatísticos. Há, normalmente, a elaboração de um projeto piloto, com a descrição dos dados observados e a geração de uma relação apropriada que representa com a maior aproximação possível, a realidade envolvida.

Segundo Fischer (1981), a modelagem refere-se à criação de sistemas que aplicam parâmetros específicos para a solução de alguns problemas e da determinação de certas características da realidade. Vasil'Chenko (1985) considera um modelo hidráulico como um processo de simulação, correspondendo as características do protótipo e do modelo, que busca resolver problemas complexos da Engenharia Hidráulica e investigar vários fenômenos relacionados.

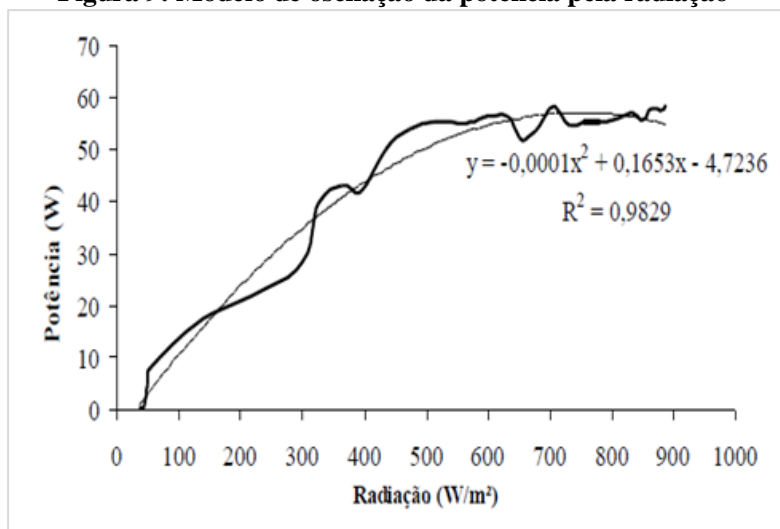
Alguns autores promoveram artigos e trabalhos acadêmicos buscando a criação de um modelo para descrever o bombeamento fotovoltaico.

Niedzialkoski et al. (2012) realizaram um experimento na cidade de Cascavel, no Paraná, utilizando um sistema de bombeamento fotovoltaico. Os autores modelaram, estatisticamente, a relação entre o volume bombeado e a potência elétrica com a radiação solar incidente. Para tanto, foram utilizados dados experimentais, realizando um ajuste por mínimos quadrados, desenvolvidos em ferramentas computacionais.

Os resultados da pesquisa estão dispostos na Figura 8 e na Figura 9:

Figura 8: Modelo de oscilação da vazão pela radiação

Fonte: Niedzialkoski et al. (2012).

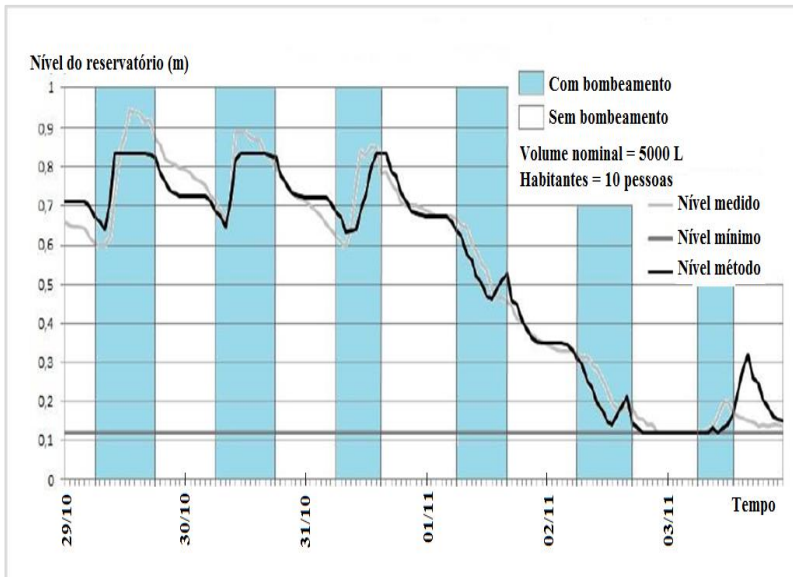
Figura 9: Modelo de oscilação da potência pela radiação

Fonte: Niedzialkoski et al. (2012).

Como pode ser observado na Figura 8 e na Figura 9, foi constatada uma correlação positiva entre volume e potência com a energia irradiada. Isto é, quando maior a radiação, maior a quantidade de água que a bomba recalcará e maior a potência elétrica. As equações polinomiais de segundo grau foram obtidas por meio de um ajuste aos mínimos quadrados, resultando em um R^2 próximo de 1, tendo, aparentemente, uma boa aderência.

Utilizando um sistema piloto elaborado em uma pequena residência em Orleans, no interior de Santa Catarina; Carvalho (2016) fez um balanço da aplicação de um sistema fotovoltaico em pequenas comunidades, tendo em vista a aplicação de um tratamento por filtração em margem. Dentre os resultados, foi observada uma tendência a uma correlação positiva entre a vazão e a radiação, como pode ser visto na Figura 10:

Figura 10: Volume bombeado e modelado durante seis dias na cidade de Orleans



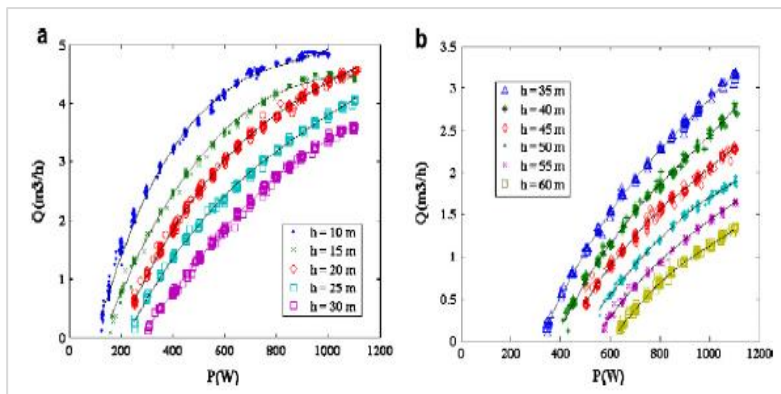
O volume modelado foi calculado a partir da elaboração de uma curva obtida por um ajuste polinomial de segundo grau, que

verificou o volume bombeado a com a radiação. Foi obtido um coeficiente de ajuste de 0,9348, refletindo bem a realidade, como visto na figura.

Ould-amrouche, Rekioua e Hamidat (2010) propuseram um modelo de oscilação da vazão em relação a potência da bomba, cujos coeficientes variariam pela altura manométrica. Os métodos utilizados para calibrar o modelo foram o dos mínimos quadrados e do desvio das médias. Os autores realizaram um trabalho na Argélia, aplicando os testes em três bombas centrífugas diferentes, com cargas hidráulicas variáveis. Verificou-se, com um erro menor que 10%, que, independente das perdas de carga, houve uma correlação positiva entre a potência da bomba e a vazão final bombeada. O modelo final teve o formato de uma equação polinomial de terceiro grau.

O comportamento de um dos testes dos autores encontra-se na Figura 11:

Figura 11: Relação entre vazão e potência para diferentes alturas manométricas

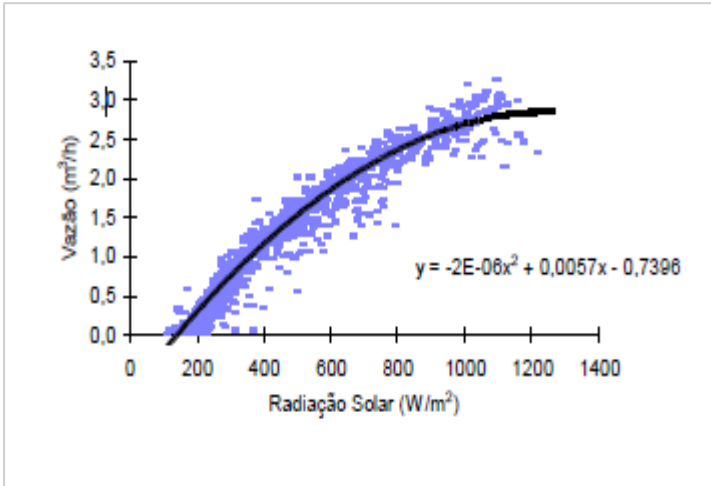


Fonte: S. Ould-Amrouche, D. Rekioua, A. Hamidat (2010).

Fraidenraich e Vilela (1999) avaliaram um sistema fotovoltaico para abastecimento de água e verificaram, dentre os resultados apresentados, as suas características operacionais. O estudo foi feito na cidade de Inajá, em Pernambuco, com um conjunto moto bomba trifásico, contendo 21 módulos fotovoltaicos (1113 Wp) e um inversor (1500 W). Após a geração de um modelo baseado em um ajuste

polinomial de segundo grau, obteve-se uma relação entre a vazão bombeada e a radiação, como pode ser visto na Figura 12:

Figura 12: Modelo numérico de oscilação da vazão pela radiação na cidade de Inajá



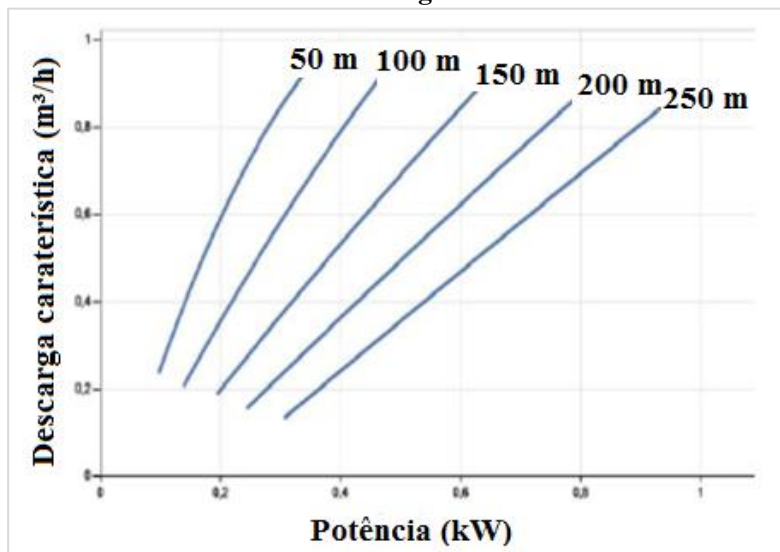
Fonte: Fraidenraich e Vilela (1999).

Os autores não divulgaram a aderência estatística do modelo, mas pode-se observar a ausência de funcionamento em radiações baixas (menores que 100 W/m²) e uma atenuação da oscilação em radiações próximas e acima da plena (1000 W/m²). Foi concluído, por meio da verificação da CCB, que, para períodos em que a insolação é baixa (200 a 400 W/m²), o comportamento do sistema se aproxima das curvas de altura manométrica próximas a 30 m, com quase nenhum rebaixamento. Em contrapartida, em dias com maior energia captada, há uma maior compatibilidade com as de maior altura manométrica (próximas a 50 m). Dessa maneira, nota-se que a carga hidráulica necessária é um fator determinante a ser analisado no processo de modelagem, não se limitando apenas à radiação.

A influência da altura manométrica nos modelos foi verificada com atenção por Setiawan et al. (2014). Os autores fizeram um estudo em Purwodadi Village, distrito de Tepus, em Gunungkidul. (Indonésia), buscando resolver problemas de abastecimento de água na região por meio da aplicação de um sistema de bombeamento fotovoltaico. A análise foi feita por balanços energéticos e não de for-

ma estatística. Foram elaboradas diversas curvas, relacionando, para cada carga hidráulica necessária, a vazão bombeada em função da potência hidráulica do conjunto (dependente da radiação), como pode ser visto na Figura 13:

Figura 13: Variação da potência pela radiação e carga hidráulica em Gunungkidul



Fonte: Adaptado de Setiawan et al. (2014).

A partir da análise da Figura 13, é possível avaliar que, quanto maior a altura manométrica, menor o volume bombeado para a mesma potência (ou maior a potência necessária para bombear o mesmo volume). Portanto, há mais um forte indício da relevância da altura manométrica na geração de modelos de sistemas fotovoltaicos.

Oyama (2008) fez um trabalho amplo, que buscou a elaboração de um modelo estatístico único que relacionasse a oscilação da vazão com a radiação. Foram feitas análises em um sistema piloto na cidade de Medianeira-PR, a partir de uma estrutura preliminarmente segregada com nove alturas manométricas diferentes, entre 2,2 e 18,2 m, em dois períodos diferentes para cada situação. Com ajustes a equações polinomiais de segundo grau, pode-se verificar uma boa aderência para cada período isoladamente, em alturas manométricas baixas. Conforme as cargas hidráulicas fossem aumentando, maior a

dificuldade em sintetizar equações para cada. Para um recalque de 2,2 m, obteve-se um coeficiente de determinação médio de 0,96, enquanto que para 18,2 m, o coeficiente foi 0,88. Por fim, o autor aplicou um ajuste único, com um modelo linear múltiplo em função da radiação e altura manométrica. Nesse caso, registrou-se um R^2 de 0,83, mostrando uma dificuldade de simplificação.

Utilizando um viés diferente dos modelos estatísticos, Zanirato, Moura e Cordeiro (2011) elaboraram uma equação baseada em um balanço energético. Foram considerados a potência do conjunto, o rendimento e o número de horas de sol pleno. O experimento foi realizado na Universidade Federal de Santa Catarina, com bombas fotovoltaicas centrífugas, buscando avaliar o seu desempenho e o comportamento da radiação.

A fórmula utilizada pelos autores encontra-se na Equação 1:

$$P(W_p) = \frac{1,25 * \frac{2,275 * Q_d * H_m}{\eta}}{HSP} \quad (1)$$

Onde,

Q_d é a vazão bombeada diária (m^3/dia); H_m é a altura manométrica (m); HSP é o número de horas de sol pleno (h) e $P(W_p)$ é a potência do conjunto (W_p).

Os autores obtiveram; para uma altura manométrica de 39,6 m, uma potência de 460 W_p e um rendimento de 50%; um volume bombeado diário de 14,723 m^3 . Como o volume médio coletado por dia foi de 14,600 m^3 , o erro apresentado pelo modelo foi de 0,84%. Apesar da grande proximidade, restaram outros testes para verificar a viabilidade efetiva do balanço energético.

A partir dos modelos avaliados e da situação apresentada, é possível verificar a existência de várias tentativas de representação da realidade. A partir das equações já criadas, há a possibilidade de comparação e utilização de critérios na criação de um modelo final representativo.

3.5. RESUMO CONCLUSIVO

Os sistemas de abastecimento de água apresentaram diversos avanços ao longo do século, visando, cada vez mais, a garantir acesso aos recursos hídricos com qualidade e quantidade para o maior

número de pessoas. Todavia, os sistemas convencionais de abastecimento e tratamento não são suficientes em certas localidades, com dificuldade de obtenção de energia elétrica para o bombeamento e com uma distância muito grande das estações de tratamento. Frente as intempéries apresentadas, pode-se pensar em alternativas, como o uso de tecnologia fotovoltaica para o bombeamento de água.

A radiação solar é um recurso natural ilimitado que pode ser usado como fonte renovável de obtenção de energia. O processo, inicialmente mais caro, foi se popularizando nas últimas décadas, podendo ser utilizado para fornecimento elétrico nas pequenas comunidades, facilitando o abastecimento. A tecnologia fotovoltaica tem como vantagens os custos inferiores de operação, baixa manutenção e boa acessibilidade em determinadas regiões. Como desvantagem, há a dependência da disponibilidade de insolação, já que a radiação varia conforme o horário, a estação do ano, o clima e a localização geográfica. Essa oscilação acaba promovendo defasagens no sistema de bombeamento, quando aplicada no abastecimento de água.

Vários estudos foram realizados de forma a verificar a oscilação do volume bombeado com a aplicação de tecnologia fotovoltaica. A potência das bombas, acaba dependendo diretamente da energia captada pelos módulos fotovoltaicos. Dessa forma, o rendimento hidráulico pode cair consideravelmente em dias de baixa insolação, promovendo vazões mínimas ou praticamente nulas. Outro fator importante que influencia na variação da descarga de recalque é a altura manométrica. Em grandes cargas hidráulicas, os equipamentos funcionam com uma potência menor, bombeando um volume ainda mais diminuto em referência à CCB. Diversos modelos foram construídos, obtendo maior ou menor aderência, dependendo da abrangência do estudo.

Mediante à variação apresentada, diversos autores buscaram uma modelagem hidráulica do funcionamento das bombas fotovoltaicas. Em um balanço geral, houve uma boa aderência dos resultados, ainda que não o suficiente para serem globalmente representativas. Na maioria das vezes o que se observa é uma dependência também do tipo e modelo de bomba e não só da radiação e altura manométrica.

A utilização desses estudos e dos conhecimentos referentes à energia solar será de fundamental importância na composição de um modelo para descrever a oscilação da descarga pela radiação.

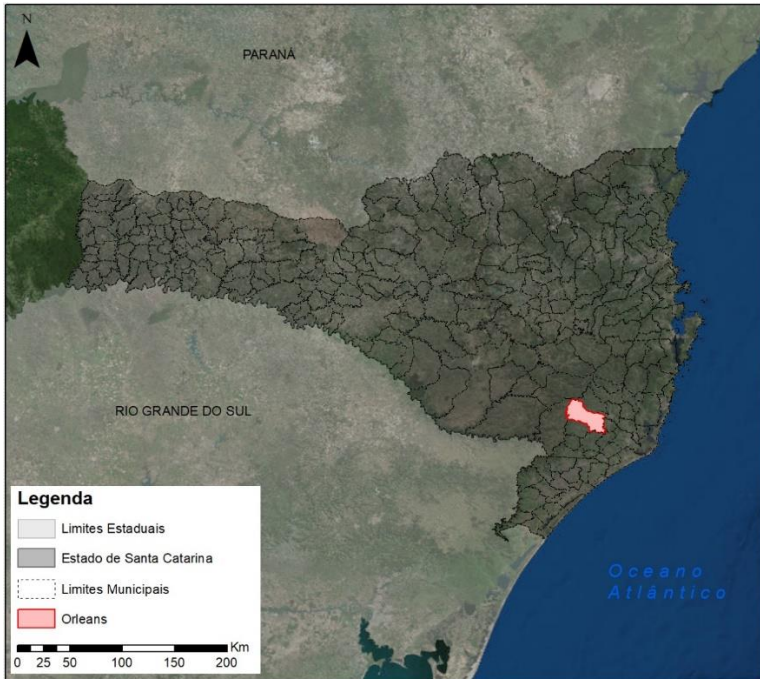
4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. ÁREA DE CARACTERIZAÇÃO

O experimento foi realizado em uma comunidade rural, na cidade de Orleans, em Santa Catarina, no Bairro Rio Belo. O local foi escolhido para a implementação do projeto piloto de filtração em margem e bombeamento fotovoltaico em uma localidade isolada, para testar a aplicabilidade do método, além de garantir a segurança dos equipamentos. Nessas áreas, há normalmente uma dificuldade de abastecimento de água pelos métodos tradicionais, tendo em vista às longas distâncias para as redes elétricas e de escoamento.

A Figura 14 detalha a localização do município, reforçando sua marca interiorana, visto que a colonização no estado se deu mais próximo do litoral e na região do Vale do Itajaí.

Figura 14: Localização do município de Orleans, no interior de Santa Catarina



Fonte: Adaptado de Nereus (2017).

Segundo o IBGE (2017), no censo demográfico realizado em 2010, Orleans é o 57º município em população de Santa Catarina, com 21.393 habitantes. Destes, 5.309 (25%) pertencem às áreas rurais, enquanto que 16.084 (75%) compõem o setor urbano. Mesmo a região não sendo essencialmente agrícola, a agropecuária, em 2013, gerou um Produto Interno Bruto (PIB) de R\$ 89.417,53, o que correspondia a uma parcela de aproximadamente 11% do total da localidade (IBGE, 2017).

O município de Orleans não possui universalização no abastecimento de água. Segundo o SNIS (2017), em 2010, 17.801 habitantes eram providos pelo sistema de distribuição do município, o que corresponde a 83% da população. Ao analisar o número de residências supridas, pode-se verificar um total de 6.035 economias ligadas a uma rede de abastecimento de 135 km de extensão.

Com uma cerca de 25% da população em área rural e com 17% dos habitantes desprovidos de sistemas de abastecimento pela rede de distribuição, cabe-se pensar em processos alternativos nessas regiões (SNIS, 2017). Portanto, a adoção do projeto piloto no interior do município de Orleans se torna justificada, considerando as necessidades exigidas e as características econômicas e demográficas apresentadas.

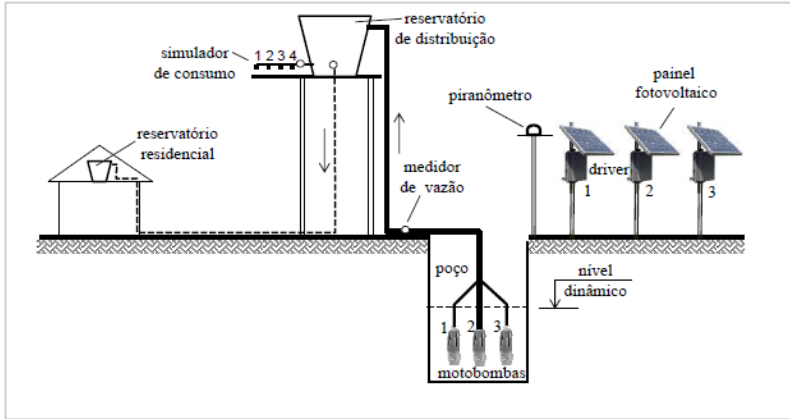
4.2. SISTEMA PILOTO

O sistema piloto foi construído em uma propriedade particular, em uma comunidade rural da cidade. O projeto é financiado pela Fundação Nacional do Meio Ambiente (FUNASA), com o objetivo de verificar a viabilidade de um processo de tratamento de filtração em margem e o abastecimento por bombeamento fotovoltaico.

O projeto é constituído por um sistema de captação em poço; um conjunto fotovoltaico contendo três bombas solares com acoplamento direto, abastecidas somente por painéis fotovoltaicos; um reservatório de armazenamento e uma rede de distribuição, caracterizada por um simulador de consumo.

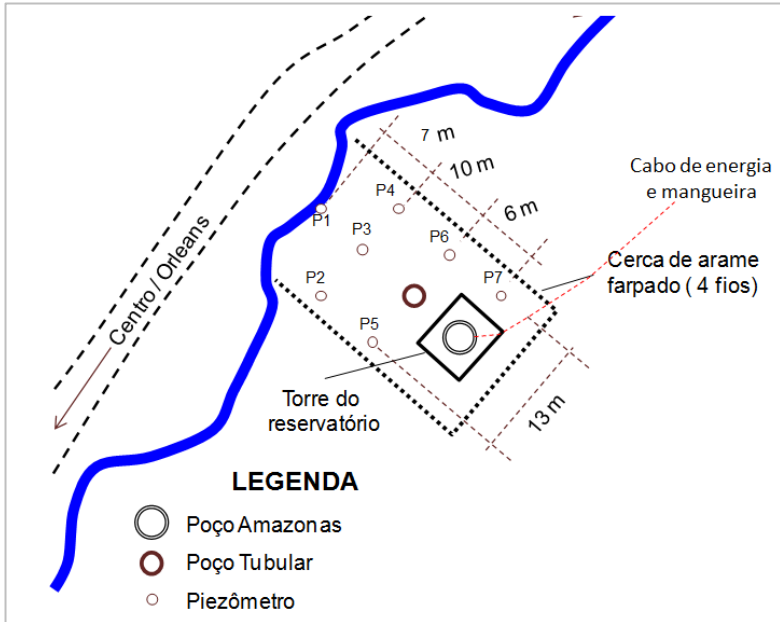
O esquema do sistema piloto pode ser visto em na Figura 15 e sua disposição em planta na Figura 16:

Figura 15: Esquema do sistema piloto realizado na cidade de Orleans (SC)



Fonte: Dalsasso (2017) para o projeto.

Figura 16: Disposição dos elementos do sistema piloto realizado na cidade de Orleans (SC)



Fonte: Dalsasso (2017) para o projeto.

Durante o andamento do projeto, houve o bombeamento por meio de dois traçados distintos. De setembro de 2015 a abril de 2016, o conjunto se baseava num poço escavado de 1,03 m de diâmetro (Sistema 1). A partir de maio de 2016, o sistema piloto contou com um poço tubular, de diâmetro interno de 20 cm (Sistema 2). Essa mudança promoveu uma alteração na disposição das bombas e nas características hidráulicas do processo. Assim, os cálculos realizados serão diferenciados para a determinação da perda de carga e da altura manométrica.

O sistema piloto é composto por diversos aparelhos, que permitem o funcionamento do mesmo e a coleta e medição de dados para análises. A seguir, haverá a descrição detalhada dos equipamentos mais relevantes para a continuidade deste trabalho.

4.2.1. Equipamentos

O sistema é composto por três bombas solares vibratórias e quatro painéis fotovoltaicos. A condução de água é feita por tubulações de PVC, com diâmetros entre 25 e 60 mm. Os dados foram coletados por medidores eletromagnéticos de vazão, um piranômetro, nove piezômetros e registradores de nível (*level logger*). A medição dos níveis foi utilizada principalmente para observar a coerência das medições de descarga.

4.2.1.1. Sistema fotovoltaico

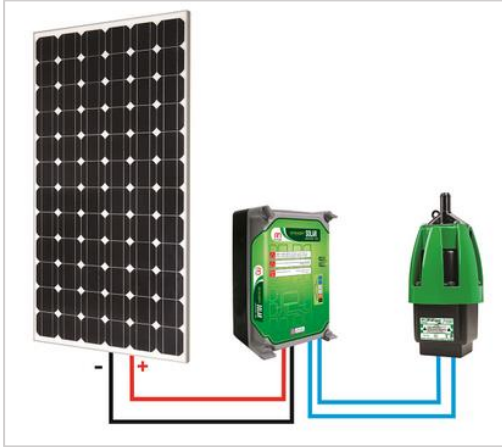
Foram utilizadas três bombas submersas vibratórias solares, da marca Anauger, com 100 W de potência cada. Esses equipamentos estão dispostos em paralelo, impulsionando o escoamento de acordo com a vazão exigida. Por consequência, em descargas mais elevadas, o conjunto inteiro encontra-se ativo; enquanto que, em vazões menores, apenas uma permanece em atividade.

O sistema de bombeamento utilizado funciona de maneira acoplada, sem ligação com a rede elétrica e nem armazenamento por meio de baterias. Dessa forma, o conjunto trabalha de forma autônoma e dependentemente exclusivamente da radiação solar. Por ser uma bomba vibratória, que funciona pela pressão dos êmbolos, não há necessidade de grandes vazões para o acionamento das bombas. Assim, mesmo em períodos de radiações pequenas, quando a descarga é baixa, ainda há o recalque. O dispositivo é controlado por um

driver na bomba, que armazena a energia em capacitores e promove o impulso hidráulico em qualquer situação.

O funcionamento do driver pode ser resumido na Figura 17:

Figura 17: Esquema da ação do driver (centro), que transfere energia do painel à bomba



Fonte: Anauger (2017).

O bombeamento é abastecido energeticamente por meio de três painéis fotovoltaicos. Estes aparelhos são compostos por módulos policristalinos, de potência de 250 W, da marca Kyocera. As células contidas nos painéis são do tipo monocristalino (Mono-SI) de 175 Wp cada. A energia é captada por meio dessas células e enviada para as respectivas bombas, de forma independente, por meio da unidade de controle.

4.2.1.2. *Aparelhos de coleta e medição dos parâmetros*

Para a elaboração do modelo numérico de oscilação da relação descarga, foi necessário o registro da vazão, da radiação solar, do tempo de bombeamento e do de insolação. Os dados foram coletados durante o andamento do experimento com a tecnologia fotovoltaica, desde abril de 2015 a dezembro de 2016. A partir deste ponto, o projeto seguiu outro caminho, distinto deste trabalho.

Com a finalidade de análise do bombeamento e consumo, foram instalados três medidores eletromagnéticos de vazão: na saída da bomba; na saída do reservatório, para o simulador de consumo; e na

saída para a propriedade particular. Destes, apenas o primeiro será de relevância para o presente trabalho, pois o objetivo do mesmo é a análise da variação da vazão de recalque.

Os medidores eletromagnéticos de vazão, de modelos VMS-019B224K e PRO1000, da marca Incontrol, são equipados por um sistema de armazenamento de dados *datalogger*. Eles registram e armazenam os dados com intervalos programados de dois minutos, permitindo a verificação do tempo de bombeamento durante o dia.

O medidor de vazão pode ser visto na Figura 18:

Figura 18: Medidor eletromagnético de vazão usado no projeto



Fonte: Incontrol (2017).

A radiação solar foi coletada por meio de um piranômetro Apogee SP-110; conectado a um armazenamento *datalogger* CR 200X, da marca Campbell Scientific. Os registros dos dados são feitos a cada 10 segundos, permitindo, também, a determinação do tempo de insolação.

Os equipamentos de medição e armazenamento da radiação solar global estão representados na

Figura 19:

Figura 19: Piranômetro (esquerda) e datalogger (direita) usados para obtenção da radiação



Fonte: Apogee (2017), Campbell Scientific (2017).

Para a medição do nível, foram utilizados equipamentos eletrônicos de medição automática (*level logger*), instalados em nove piezômetros, no poço e no reservatório. O nível d'água não será utilizado diretamente no decorrer deste trabalho, mas foi fundamental para verificar a calibração dos medidores de vazão.

4.3. OBTENÇÃO DOS PARÂMETROS DO MODELO

As curvas características das bombas solares apresentam dados referentes à radiação plena. É observado, no entanto, por meio dos estudos citados, uma oscilação da vazão com insolação incidente, em um sistema de bombeamento fotovoltaico. Portanto, há a necessidade de se determinar a relação de descarga por meio de uma função. Esse rendimento indica a razão entre a vazão real e a plena (Q/Q_P).

A relação de descarga é importante na simulação de projetos de abastecimento de água. Portanto, é possível calcular o volume bombeado, conhecendo-se a vazão da CCB; e a oscilação da vazão com a variação da radiação ao longo de um período.

Por meio dos estudos realizados anteriormente, pode-se destacar que a relação de descarga depende de dois fatores principais: a radiação solar média (W/m^2) e a altura manométrica (m). A partir disso, foram elaborados diversos caminhos, buscando uma equação que determinasse, com a maior aderência possível, o comportamento da relação de descarga em função desses dois parâmetros.

4.3.1. Tratamento dos dados coletados

Os dados de vazão e radiação foram armazenados em planilhas eletrônicas e segregados diariamente, obtendo-se um conjunto de dados para cada dia de medição.

Devido aos períodos de tempo distintos de medição e de forma a minimizar a dispersão, calculou-se um valor representativo diário. A vazão foi compilada durante o tempo de bombeamento, obtendo-se o volume total bombeado a cada dia. A radiação, captada em forma energética (Wh/m^2), foi ajustada pelo período de insolação, chegando-se a também a uma incidência média diária (W/m^2).

Vale-se ressaltar que, para o cálculo da incidência média diária, foi necessário o registro do número de horas de insolação para cada dia, a fim de ter um resultado mais significativo e não generalizado.

O cálculo da radiação média encontra-se na Equação 2:

$$I_{\text{médio}} = \frac{I_{\text{total}}}{N_{\text{sol}}} \quad (2)$$

Onde,

$I_{\text{médio}}$ é a radiação média diária (W/m^2); I_{total} é a radiação total somada diária (Wh/m^2) e N_{sol} é o número de horas com insolação acima de 300 W/m^2 em um dia (h).

Após a obtenção de valores diários de radiação e vazão, esses parâmetros foram organizados separadamente em dois conjuntos de dados: Sistema 1 e Sistema 2, ambos em ordem crescente de radiação, independentemente da ordem cronológica. Após essa organização, excluíram-se os valores dos dias com problemas na coleta ou que apresentaram valores inconsistentes. A incoerência foi observada comparando-se os dados com o nível do reservatório e excluindo os consumos noturnos.

Com a construção das listas dos dados coletados, pode-se iniciar os cálculos para a obtenção da vazão plena e da altura manométrica, como será discutido a seguir.

4.3.2. Construção das curvas características

Para a obtenção da Vazão Plena (Q_p), foi necessária a construção das curvas características das bombas dos sistemas, com a finalidade de se adquirir os pontos de funcionamento.

A CCB foi extraída do manual técnico da Anauger, considerando uma radiação de 6 kW/m^2 . Foram construídas também as cur-

vas, considerando uma associação em paralelo com duas e três bombas.

A forma de construção das curvas de um conjunto de bombas está descrita na Equação 3:

$$Q_{conj}(i) = n * Q_{CCB}(i) \quad (3)$$

Onde,

$Q_{conj}(i)$ é a vazão do conjunto para um determinado ponto (m^3/h); n é o número de bombas do conjunto e Q_{catal} é a vazão da CCB para o mesmo ponto (m^3/h).

A curva do sistema foi construída a partir de uma análise hidráulica e energética do processo, realizando uma oscilação na vazão e calculando as respectivas perdas de carga.

Os procedimentos de cálculo estão descritos nas equações 4, 5, 6 e 7:

$$H_i = H_g + \Delta H_i \quad (4)$$

$$\Delta H_i = \Delta H_i(dist) + \Delta H_i(loc) \quad (5)$$

$$\Delta H_i(dist) = 0,0008695 * \frac{Q_i^{1,75}}{D^{4,75}} * L \quad (6)$$

$$\Delta H_i(loc) = \Sigma k * \frac{v_i^2}{2 * g} \quad (7)$$

Onde,

H_i é a altura manométrica para determinada vazão Q_i (m); H_g é a altura geométrica do sistema (m); ΔH_i é a perda de carga para determinada vazão Q_i (m); $\Delta H_i(dist)$ é a perda de carga distribuída para determinada vazão Q_i (m); $\Delta H_i(loc)$ é a perda de carga localizada para determinada vazão Q_i (m); Q_i é a vazão variável (m^3/s); D é o diâmetro interno da tubulação (m); v_i é a velocidade para determinada vazão Q_i (m/s); L é o comprimento da tubulação (m); Σk é a soma das singularidades descritas nas perdas localizadas e g é a aceleração da gravidade (m/s^2).

Após a determinação da curva de sistema para cada um dos dois arranjos, e das curvas das associações, foi possível a obtenção do ponto de funcionamento para cada situação.

Com a definição dos pontos de funcionamento, formaram-se os conjuntos finais a serem utilizados nas composições dos modelos.

4.4. ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS DADOS DE CAMPO

Para a construção de um modelo, é necessária a confirmação da correlação estatística entre os parâmetros apresentados, verificando se há uma associação e se a mesma é positiva ou negativa. Para tanto, são necessárias análises dos dados envolvidos e das categorias correspondentes.

Para os modelos desenvolvidos neste trabalho, há três variáveis envolvidas: relação de descarga, radiação média e altura manométrica. Como objetivo é determinar a primeira, deve-se correlacioná-la separadamente com as duas últimas.

A correlação estatística é medida por meio de diferentes testes de hipótese, de acordo com as características apresentadas pelas variáveis. O resultado final de cada teste, é convertido de forma unificada para um coeficiente denominado *p*valor, um parâmetro probabilístico (NASSAR ET AL., 2017).

O primeiro passo da análise estatística é a caracterização dos componentes individualmente. Variáveis compostas por dados numéricos são consideradas quantitativas; enquanto as formadas por categorias são qualitativas. Em alguns casos, alguns parâmetros naturalmente quantitativos podem ser convertidos em qualitativos, se houver uma baixa diversidade de valores (NASSAR ET AL., 2017).

Definindo-se as variáveis, deve-se estabelecer um nível de significância (α), ou seja, a probabilidade máxima de erro aceitável para os testes apresentados. Com isso, podem-se iniciar os testes de hipótese, gerando duas alternativas: H_1 ou H_0 , que serão diferentes de acordo com o procedimento aplicado (NASSAR ET AL., 2017).

A decisão estatística será dada pela comparação entre o *p*valor e o nível de significância. O *p*valor representa a probabilidade de erro ao se inferir na hipótese H_1 . Em uma análise preliminar, se o mesmo for menor do que α , o erro está dentro da faixa aceitável, podendo-se afirmar que a hipótese H_1 é verdadeira. Entretanto, há algumas particularidades, como será discutido posteriormente (NASSAR ET AL., 2017).

Para a definição dos testes estatísticos, deve-se verificar em qual conjunto se encontram as variáveis. Se as duas forem quantitativas, os procedimentos serão referentes a uma análise quanti-quantitativa; se uma das duas for qualitativa, será quali-quantitativa. Há também a análise quali-qualitativa, mas não será abordada neste trabalho.

Os testes estatísticos foram feitos no software online de estatística, o Sestat.net, gerando os resultados após a definição preliminar das características das variáveis.

4.4.1. Análise quanti-quantitativa

A análise quanti-quantitativa compara a correlação (positiva ou negativa) entre duas variáveis numéricas, como já foi explicado.

O primeiro passo do procedimento consiste em verificar a aderência à curva normal para cada uma das duas variáveis. O teste aplicado é o X^2 de Aderência, cujas hipóteses, previamente estabelecidas, indicam a presença de diferença entre os dados e a curva de distribuição normal (H1) ou a ausência (H0) (NASSAR ET AL., 2017).

O resultado numérico do Teste X^2 de Aderência é a distância X^2 , ou seja, o desvio dos dados em relação ao idealizado pela curva normal. Quanto maior for esse valor, mais distante os dados estarão da normalidade. Para a confirmação estatística, essa distância é convertida em um pvalor e comparada com o nível de significância. Se o pvalor for menor que α , não há normalidade (H1); se for maior, há (H0) (NASSAR ET AL., 2017).

O teste X^2 de aderência é resumido pela Equação 8:

$$X^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(O_i - E_i)^2}{E_i} \quad (8)$$

Onde,

X^2 é o coeficiente de aderência a uma distribuição normal; O_i é a frequência obtida para cada dado da respectiva variável; E_i é a frequência esperada correspondente para cada dado da respectiva variável; i é o identificador de cada amostra e n é quantidade de amostras.

Após a definição da normalidade, pode-se aplicar o teste estatístico respectivo. Em caso de existência de normalidade, utiliza-se o Teste de Correlação de Pearson; caso contrário utiliza-se o Teste de Correlação de Spearman (NASSAR ET AL., 2017).

Para as duas vertentes da análise quanti-quantitativa, utilizam-se três possibilidades: se há correlação entre as variáveis e conhece-se se é positiva ou negativa (H1); se há relação desconhecendo a tendência (H1), ou se não há influência (H0).

O resultado numérico do Teste de Correlação de Pearson é o coeficiente t, de Student. Quanto maior esse valor, maior é a probabilidade de correlação entre as variáveis e, portanto, menor o pvalor (NASSAR ET AL., 2017).

O coeficiente t de Student é definido pela Equação 9:

$$t = \frac{r * \sqrt{n - 2}}{\sqrt{1 - r^2}} \quad (9)$$

Onde,

t é o coeficiente de Student; r é o coeficiente de correlação estatística e n é o número de amostras.

Para o Teste de Correlação de Spearmann, chega-se a um coeficiente ρ , que varia de 0 a 1. Quanto mais próximo de 1, maior a correlação estatística. Para fins práticos, acima de 0,9, há uma correlação elevada (NASSAR ET AL., 2017).

O coeficiente de Spearmann está descrito na Equação 10:

$$\rho = 1 - \frac{6 * \sum_{i=1}^n d_i^2}{n * (n^2 - 1)} \quad (10)$$

Onde,

ρ é o coeficiente de correlação de Spearmann; d_i é o desvio local dos dados em relação à média, i é o identificador de cada amostra e n é quantidade de amostras.

A confirmação estatística dos dois testes é feita pela conversão de seus coeficientes em um pvalor. Se o mesmo for maior que o nível de significância, não há relação (H0), se for menor, há relação (H1) e se for inferior à metade de α , pode-se visualmente confirmar a tendência positiva ou negativa (H1) (NASSAR ET AL., 2017).

4.4.2. Análise quali-quantitativa

A análise quali-quantitativa verifica se a mudança de categoria na variável qualitativa está promovendo uma alteração significativa nos valores da quantitativa. Os procedimentos correspondentes exigem uma variedade maior de testes finais e intermediários do que na quanti-quantitativa.

O esquema dos procedimentos aplicados pode ser visto na Tabela 1:

Tabela 1: Caminhos da análise quali-quantitativa

Categorias	Normal	Variância	Teste	Observação
2	Sim	Homocedástico	T-Student	Variância agregada
2	Sim	Heterocedástico	T-Student	Sem variância agregada
2	Não	–	U de Mann-Whitney	–
> 2	Sim	Homocedástico	Anova F	–
> 2	Sim	Heterocedástico	Anova Kruskal	–
> 2	Não	–	Anova Kruskal	–

Fonte: Adaptado de Nassar et al. (2017).

Como pode ser observado na Tabela 1, o primeiro passo é a verificação do número de categorias presente na variável qualitativa. Esse procedimento é feito a critério do analisador, dependendo das necessidades.

A verificação da normalidade é feita de forma semelhante à da quanti-quantitativa, utilizando o Teste X^2 de aderência (Equação 8). Primeiramente, realiza-se uma segregação dos dados da variável quantitativa em conjuntos correspondentes às categorias da qualitativa. Para a confirmação estatística, todos os grupos devem possuir aderência à curva normal (hipótese H_0) (NASSAR ET AL., 2017).

Se houver confirmação da normalidade, faz-se a análise da homocedasticidade para cada um dos conjuntos segregados. Esse

componente indica se as variâncias entre os diferentes grupos são semelhantes (NASSAR ET AL., 2017).

A análise estatística para a determinação da homocedasticidade consiste no Teste de Levene, que indica se a amostra é heterocedástica (H1) ou homocedástica (H0). O resultado final é a medida estatística W (NASSAR ET AL., 2017), definido pela Equação 11:

$$W = \frac{n - k}{k - 1} * \frac{\sum_{i=1}^k n_i * (D_i - D)^2}{\sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} (D_{ij} - D_i)^2} \quad (11)$$

Onde,

W é o coeficiente do Teste de Levene, n é o número de observações total, n_i é o número de observações da respectiva categoria; k é o número de categorias da variável qualitativa; D_{ij} é a dispersão na respectiva categoria; D_i é a média das dispersões de uma categoria; D é a média das dispersões entre as duas categorias; i é o identificador das amostras e j o identificador das categorias.

Após a definição da homocedasticidade, se necessário, é possível escolher entre os testes acima. Cada um possui um coeficiente diferente, determinado pelo Sestat.net. Os critérios de decisão estatística são idênticos aos da análise quanti-quantitativa.

4.5. SEGREGAÇÃO DOS DADOS PARA A MODELAGEM

Como início do processo de modelagem, houve a segregação dos valores já obtidos em dois grupos: aprendizagem e teste. Os valores do primeiro foram utilizados para a construção do modelo, enquanto que os do segundo, apenas para a validação das equações.

A segregação foi feita de forma estratificada, separando os valores primeiramente por sistema, em seguida por altura manométrica e, por fim, por faixas de radiação. Em cada conjunto formado, foram definidos aleatoriamente 60% dos dados para comporem o grupo de aprendizagem, enquanto que os 40% restantes foram utilizados para o teste.

A divisão dos dados é importante para confirmar a capacidade de generalização do modelo criado. Dessa forma, as equações são geradas por apenas uma parte dos dados totais, enquanto é testada em medições que não fizeram parte da sua elaboração. Se há uma

semelhança entre os resultados de aderência, significa provavelmente que o modelo pode ser expandido.

4.6. MODELAGEM DA RELAÇÃO DE DESCARGA

A modelagem da relação de descarga foi feita com base no método dos mínimos quadrados e buscou três alternativas: modelo linear (Modelo 1), linearizado (Modelo 2) e não linear (Modelo 3).

O método aplicado consiste na determinação dos coeficientes da equação a ser gerada, de forma que haja a minimização da soma das distâncias quadráticas entre cada valor calculado pelo modelo e sua respectiva medição em campo.

A minimização da soma dos desvios quadráticos é um método eficaz, pois não há cancelamento de erros com sinais diferentes, além de acentuar grandes distâncias e minimizar as pequenas.

Para a obtenção da minimização das distâncias, as derivadas parciais da equação principal em função dos coeficientes a serem ajustados devem ser nulas. Dessa forma, gera-se um sistema de equações, cujas variáveis são os próprios coeficientes.

Apesar dos três ajustes se basearem no método dos mínimos quadráticos, cada um possui peculiaridades a serem explicitadas.

4.6.1. Regressão linear

O método de regressão linear é o mais simples dentre os três que serão apresentados. O mesmo consiste na geração de uma equação cujo expoente das variáveis é igual a 1 (PETERS; SZEREMETA, 2017).

O formato genérico da equação final da regressão linear está indicado na Equação 12:

$$\frac{Q}{Q_P} = a + b * I + c * Hm \quad (12)$$

Onde, Q/Q_P é a relação de descarga do modelo; I é a radiação média (W/m^2); Hm é a altura manométrica (m) e a , b e c são os coeficientes a serem ajustados.

A função desvio quadrático está mostrada na Equação 13:

$$DQ = \sum_{i=1}^n (a + b * I_i + c * Hm_i - RD_i)^2 \quad (13)$$

Onde,

DQ é o desvio quadrático, I_i é a radiação correspondente a cada medição (W/m^2), Hm_i é a altura manométrica para medição (m); RD_i é a relação de descarga de campo para cada medição; a, b e c são os coeficientes a serem ajustados; n é o número de amostras e i é o identificador da amostra.

Após realizar as derivadas parciais do desvio em função de a, b e c; foi possível obter um sistema de equações lineares, descrito em 14:

$$\begin{pmatrix} n & \sum_{i=1}^n I_i & \sum_{i=1}^n Hm_i \\ \sum_{i=1}^n I_i & \sum_{i=1}^n (I_i^2) & \sum_{i=1}^n (Hm_i * I_i) \\ \sum_{i=1}^n Hm_i & \sum_{i=1}^n (Hm_i * I_i) & \sum_{i=1}^n (Hm_i^2) \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} a \\ b \\ c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum_{i=1}^n RD_i \\ \sum_{i=1}^n (RD_i * I_i) \\ \sum_{i=1}^n (RD_i * Hm_i) \end{pmatrix} \quad (14)$$

Como se pode observar, há três equações lineares e três incógnitas, o que permite a determinação dos coeficientes por métodos matriciais simples.

4.6.2. Regressão linearizada

A regressão linearizada é um método que se baseia na conversão de uma equação não linear em linear, por meio da aplicação de logaritmos (PETERS; SZEREMETA, 2017).

O modelo final a ser determinado e sua forma linearizada estão mostrados, respectivamente, na Equação 15 e Equação 16:

$$\frac{Q}{Q_P} = a * I^b * Hm^c \quad (15)$$

$$\ln\left(\frac{Q}{Q_P}\right) = \ln a + b * \ln I + c * \ln Hm \quad (16)$$

Onde, Q/Q_P é a relação de descarga do modelo; I é a radiação média (W/m^2); H_m é a altura manométrica (m) e a , b e c são os coeficientes a serem ajustados.

A partir da Equação 16, podem-se aplicar os mesmos procedimentos do método de regressão linear, já que não há mais coeficientes no expoente.

A função desvio quadrático está mostrada na Equação 17:

$$DQ = \sum_{i=1}^n (\ln a + b * W_i + c * V_i - F_i)^2 \quad (17)$$

Onde,

DQ é o desvio quadrático, W_i é o logaritmo da radiação correspondente a cada medição ($\ln W/m^2$), V_i é o logaritmo da altura manométrica para medição ($\ln m$); F_i é o logaritmo da relação de descarga de campo para cada medição; a , b e c são os coeficientes a serem ajustados; n é o número de amostras e i é o identificador da amostra.

As derivadas parciais da equação serão equivalentes às geradas anteriormente, apresentando um sistema próximo do método linear. O resultado final está descrito em 18:

$$\begin{pmatrix} n & \sum_{i=1}^n W_i & \sum_{i=1}^n V_i \\ \sum_{i=1}^n W_i & \sum_{i=1}^n (W_i^2) & \sum_{i=1}^n (W_i * V_i) \\ \sum_{i=1}^n V_i & \sum_{i=1}^n (W_i * V_i) & \sum_{i=1}^n (V_i^2) \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} \ln a \\ b \\ c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum_{i=1}^n F_i \\ \sum_{i=1}^n (F_i * W_i) \\ \sum_{i=1}^n (F_i * V_i) \end{pmatrix} \quad (18)$$

O sistema gerado com três equações lineares e três incógnitas pode ser resolvido de forma simples. Por fim, determina-se o coeficiente a , elevando o Número de Euler na incógnita $\ln a$.

O problema da aplicação da regressão linearizada está no cálculo dos desvios quadráticos, determinados pela distância entre os logaritmos e não entre as funções originais. Essa questão pode inter-

ferir na aderência, reduzindo a eficácia do modelo (PETERS; SZEREMETA, 2017).

4.6.3. Regressão não-linear

O método da regressão não linear apresenta um maior grau de complexidade perante os demais, pois o sistema final não pode ser resolvido pela forma matricial simples, porque não há linearidade, exigindo métodos mais complexos (PETERS; SZEREMETA, 2017).

O modelo foi construído buscando garantir uma correlação positiva entre a relação de descarga e radiação e uma negativa entre esse rendimento e a altura manométrica. A equação genérica obtida apresenta o formato descrito na Equação 19:

$$\frac{Q}{Q_p} = \frac{I^y}{1000} - k * Hm^x \quad (19)$$

Onde,

Onde, Q/Q_p é a relação de descarga do modelo; I é a radiação média (W/m^2); Hm é a altura manométrica (m) e y , k e x são os coeficientes a serem ajustados.

Por meio dessa equação, verifica-se que não há linearidade nos parâmetros. Vale-se ressaltar que, para garantir as correlações explicitadas, os coeficientes em questão devem ser positivos e não nulos.

Para a determinação dos coeficientes, aplicou-se, como nos demais, o método dos mínimos quadráticos. A função desvio quadrático está descrita na Equação 20:

$$DQ = \sum_{i=1}^n \left(\frac{I_i^y}{1000} - k * Hm_i^x - RD_i \right)^2 \quad (20)$$

Onde,

DQ é o desvio quadrático, I_i é a radiação correspondente a cada medição (W/m^2), Hm_i é a altura manométrica para medição (m); RD_i é a relação de descarga de campo para cada medição; y , k e x são os coeficientes a serem ajustados; n é o número de amostras e i é o identificador da amostra.

As derivadas parciais, em relação a cada coeficiente (x , k e y), geram um sistema de equações não lineares, como pode ser visto em 21:

$$\begin{pmatrix} \sum_{i=1}^n \left[\left(\frac{I_i^y}{1000} - k * Hm_i^x - RD_i \right) * I_i^y * \ln(I_i) \right] \\ \sum_{i=1}^n \left[\left(\frac{I_i^y}{1000} - k * Hm_i^x - RD_i \right) * Hm_i^x \right] \\ \sum_{i=1}^n \left[\left(\frac{I_i^y}{1000} - k * Hm_i^x - RD_i \right) * Hm_i^x * \ln Hm_i^x \right] \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (21)$$

Para a solução do sistema não linear apresentado, utilizou-se o método de Newton por derivadas numéricas. O método consiste em um processo iterativo de contínua atualização dos valores iniciais. A cada tentativa, há o cálculo do incremento a ser realizado nos coeficientes para a próxima etapa. O critério de parada ocorre quando o incremento é um valor próximo de zero. No caso, foi adotado 10^{-12} (PETERS; SZEREMETA, 2017).

O método de Newton é definido de forma matricial, em que a cada iteração é resolvido um sistema linear obtido da linearização das equações, como pode ser visto em 22:

$$\begin{pmatrix} \frac{\partial f1}{\partial y} & \frac{\partial f1}{\partial k} & \frac{\partial f1}{\partial x} \\ \frac{\partial f2}{\partial y} & \frac{\partial f2}{\partial k} & \frac{\partial f2}{\partial x} \\ \frac{\partial f3}{\partial y} & \frac{\partial f3}{\partial k} & \frac{\partial f3}{\partial x} \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} \Delta y \\ \Delta k \\ \Delta x \end{pmatrix} = - \begin{pmatrix} f1 \\ f2 \\ f3 \end{pmatrix} \quad (22)$$

Onde,

$f1$, $f2$ e $f3$ são as funções descritas em cada linha de (22), x , y e k são os coeficientes a serem determinados e Δx , Δy e Δk representam os incrementos que devem ser acrescidos aos coeficientes nas próximas iterações.

Assim, a cada iteração, novos coeficientes serão calculados. Se o processo convergir, após algumas tentativas o incremento máximo tenderá a zero e pode-se encontrar a solução.

4.6.4. Verificação da eficácia dos modelos

Os três modelos foram analisados por meio do coeficiente de determinação e da análise dos desvios locais. A discussão foi realizada individualmente e comparativamente.

4.6.4.1. Coeficiente de determinação

O coeficiente de determinação, conhecido popularmente como R^2 , indica o quanto a variabilidade dos dados é justificada pelo modelo em questão.

O cálculo do coeficiente de determinação está mostrado na Equação 23:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (X_m(i) - X_c(i))^2}{\sum_{i=1}^n (X_m(i) - \bar{X})^2} \quad (23)$$

Onde,

R^2 é o coeficiente de aderência; $X_c(i)$ é o valor calculado pelo modelo; $X_m(i)$ é o valor medido em campo e \bar{X} é o valor médio dos valores medidos em campo.

Como pode ser observado na Equação 23, o numerador indica o somatório das distâncias quadráticas. Assim, a princípio, quanto menores as distâncias, mais próximo de 1 é o R^2 e maior a aderência.

O valor do R^2 pode ter sua interpretação equivocada quando comparado de forma bruta. Isso se dá, porque o mesmo pode ser aumentado ou diminuído de acordo com a quantidade de dados, mascarando o resultado final (QUININO; REIS; BESSEGATO, 2017).

4.6.4.2. Desvios locais

Os desvios locais, ou erros, representam a distância absoluta de cada ponto medido para o seu respectivo valor calculado. Um

bom modelo apresenta um equilíbrio entre desvios negativos e positivos, oscilando de forma alternada.

Para a análise dos desvios locais, deve-se observar o comportamento das oscilações; os picos máximos de erros; as localizações dos pontos discrepantes; além do desvio médio.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As análises foram feitas a partir dos dados obtidos em campo, buscando o modelo mais adequado para as bombas vibratórias.

5.1. COLETA E TRATAMENTO DOS DADOS DE CAMPO

As medições foram segregadas para as duas etapas do projeto, conforme definido nos procedimentos metodológicos. No total, foram agregados 230 conjuntos de dados diários para o Sistema 1 e 196 para o Sistema 2.

Vale-se ressaltar que, durante o período em que o projeto esteve ativo com sistema de bombeamento fotovoltaico, de setembro de 2015 a dezembro de 2016, foram registrados problemas de incrustações nas linhas de recalque individuais, devido à movimentação de finos no aquífero no entorno do poço, causando um aumento da perda de carga real. Esse fato foi se atenuando até praticamente desaparecer.

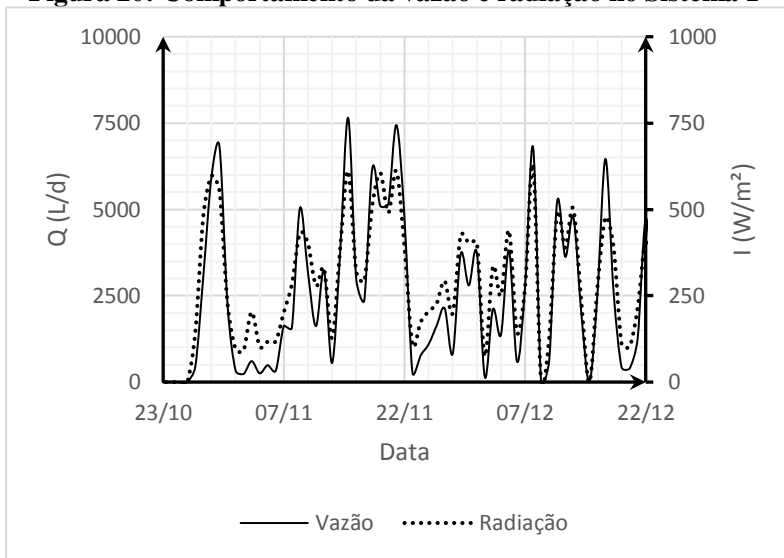
Pode-se destacar o período em novembro de 2016, obrigando o descarte da maior parte dos dados deste mês. Além disso, o piranômetro e o medidor de vazão o estiveram descalibrados em diversos momentos, tornando muitas medidas incoerentes, como o registro de descarga em períodos noturnos.

O descarte foi feito considerando os problemas já citados e a falta de coerência entre a medição da vazão de bombeamento e o nível d'água apresentado no reservatório.

Após o refinamento e a retirada de informações de dias incoerentes, foram obtidos 180 conjuntos de dados consistentes para o Sistema 1 e 100 para o Sistema 2.

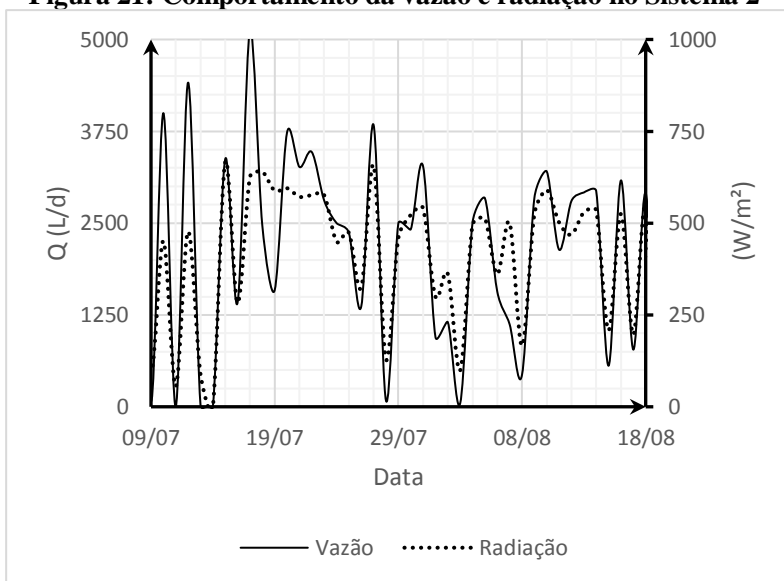
Com a segregação dos dados, pôde-se observar o comportamento da vazão em função da radiação em cada uma das duas categorias apresentadas. A Figura 20 e a Figura 21 retratam a variação dos dois parâmetros em períodos de medição para o Sistema 1 e Sistema 2, respectivamente.

Figura 20: Comportamento da vazão e radiação no Sistema 1



Fonte: Autoria própria (2017).

Figura 21: Comportamento da vazão e radiação no Sistema 2



Fonte: Autoria própria (2017).

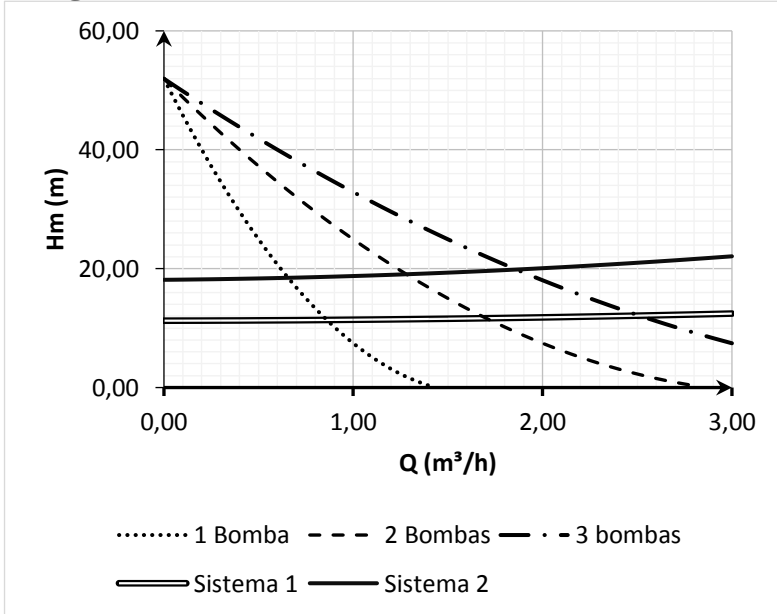
Por meio da observação das Figura 20 e Figura 21, pode-se perceber que as duas curvas (vazão e radiação) seguem a mesma tendência para ambos os casos. Isso indica uma possível confirmação da hipótese de que a intensidade da radiação influencia na quantidade de água recalcada pela bomba, num sistema fotovoltaico. Faz-se a necessidade, sobretudo, de confirmação estatística.

É importante analisar que, além das duas grandezas serem visualmente positivamente proporcionais, o sistema de bombeamento não é cessado, mesmo em baixas radiações. Isso ocorre, porque é possível recalcar água em bombas vibratórias, com intensidades de insolação inferiores às bombas centrífugas.

5.2. DETERMINAÇÃO DA ALTURA MANOMÉTRICA E DA VAZÃO PLENA

Foram construídas as curvas características da bomba e das associações, e a curva do Sistema 1 e do Sistema 2. O encontra-se na Figura 22:

Figura 22: Curvas características das bombas e do sistema



Fonte: Autoria própria (2017).

Constatou-se que, durante o período de observação, não houve o funcionamento de uma bomba isolada. Dessa forma, os pontos de trabalho respectivos foram excluídos, restando apenas quatro conjuntos de dados: Sistema 1A (duas bombas); Sistema 1B (três bombas); Sistema 2A (duas bombas); Sistema 2B (duas bombas)

Por meio da análise da Figura 22, é possível observar que, para as associações de duas e três bombas, há uma alteração sensível na altura manométrica para um mesmo sistema (não ultrapassando 80 cm). Dessa forma, há a possibilidade de agrupamento desse parâmetro para fins estatísticos, não prejudicando na análise.

Com os quatro conjuntos formados, foi possível a obtenção dos respectivos pontos de funcionamento, indicando a vazão plena e a altura manométrica para cada caso. Esses pontos estão descritos na Tabela 2:

Tabela 2: Pontos de funcionamento para os conjuntos analisados

Sistema	Vazão Plena (L/h)	Altura manométrica (m)
Sistema 1A	1.702	11,66
Sistema 1B	2.511	12,10
Sistema 2A	1.281	19,06
Sistema 2B	1.861	19,85

Fonte: Autoria própria (2017).

Para todos os dias de medição, foi registrado o respectivo número de horas de sol, o que permite determinar a vazão plena diária para cada situação. Com os dados obtidos em L/d, foi possível determinar a relação de descarga para cada situação.

Após o cálculo da relação de descarga de campo, da altura manométrica e da radiação, há a possibilidade da realização de um ajuste a fim de obter a equação.

5.3. ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS DADOS DE CAMPO

A avaliação estatística dos dados de campo é necessária para a confirmação das tendências e do formato da equação final do modelo. Para tal, foi necessária a análise dos parâmetros determinados (altura manométrica e radiação), verificando se os mesmos apresentam correlação com a oscilação da relação de descarga e se essa associação é positiva ou negativa.

5.3.1. Análise da correlação entre relação de descarga e radiação

Com dados numéricos suficientes para ambas as categorias, os testes para a verificação da correlação entre relação de descarga com a radiação seguiram os preceitos da análise quanti-quantitativa.

A descrição estatística dos dados encontra-se na Tabela 3:

Tabela 3: Dados estatísticos de relação de descarga e radiação

Descrição Estatística	Relação de descarga (adimensional)	Radiação (W/m ²)
Observações	280	280
Média	0,163	367
Desvio-padrão	0,107	184
Mediana	0,176	366

Fonte: Autoria própria (2017).

A Figura 20 e a Figura 21 demonstram, visualmente, a influência da radiação na vazão. Todavia, pode-se verificar na Tabela 3, que os dados de radiação estão muito abaixo da radiação plena (1000 W/m²). Como a relação de descarga está inferior a 1, a vazão real é mais baixa que a da CCB. Pode-se destacar, assim, um forte indício da correlação positiva entre esses dois parâmetros.

A Tabela 3 mostra, além da possível correlação, que as variáveis provavelmente não são diretamente proporcionais, apesar da correlação positiva, já que a vazão média se rebaixou a 16% da vazão plena, enquanto a radiação média a apenas 37%. Dessa forma, uma eventual modelagem baseada na regressão linear sem adaptações pode incorrer a uma aderência inferior à desejada.

Por se tratar de duas variáveis quantitativas, aplicou-se o Teste X² de Normalidade em ambos, afim de determinar o método estatístico mais adequado para avaliar a correlação entre os parâmetros.

Para a relação de descarga, obteve-se uma distância X² de 36,05, o equivalente a um pvalor de $2,7 \cdot 10^{-6}$. Esse resultado indica que há $2,7 \cdot 10^{-4}\%$ de chance de erro ao afirmar que há diferença entre o modelo apresentado e a curva de distribuição normal. Como o nível de significância foi considerado 0,05 (erro máximo aceitável para a análise igual a 5%), pode-se inferir que, estatisticamente, não há presença de normalidade para essa variável.

Para a radiação, a distância X² foi 49,89 o que resultou num pvalor inferior a $1,0 \cdot 10^{-6}$. Isso significa que os dados estão ainda

mais distantes da distribuição normal do que no caso da relação de descarga. Dessa forma, novamente há a confirmação estatística da ausência de normalidade.

Como não há normalidade em nenhum dos dois casos, foi aplicado o Teste de Correlação de Spearman. O coeficiente r de Spearman resultou em 0,945, gerando um p valor inferior a $1,0 \cdot 10^{-6}$. Isso indica que afirmar que há relação entre as variáveis, possui chance de erro inferior a $1,0 \cdot 10^{-4}\%$. Ao verificar que o p valor é menor que a metade do nível de significância, pode-se garantir a correlação positiva entre as variáveis.

Confirmada a associação estatística, pode-se inserir a radiação no modelo de determinação da relação de descarga, com uma correlação positiva.

5.3.2. Análise da correlação entre relação de descarga e altura manométrica

Devido a pouca variabilidade de dados de altura manométrica (apenas quatro, sendo que, para o mesmo sistema, há pouca diferença), não é válida a análise quantitativa tão somente. Dessa forma, caracterizou-se o parâmetro como uma variável qualitativa, expresso em dois segmentos: Sistema 1 e Sistema 2. Assim, os processos utilizados basearam-se em uma análise quali-quantitativa.

A descrição estatística dos dados encontra-se na Tabela 4:

Tabela 4: Dados estatísticos da relação de descarga (adimensional) para os dois tipos de poço

Descrição Estatísticas	Sistema 1 (Hm \approx 12 m)	Sistema 2 (Hm \approx 19 m)
Observações	180	100
Média	0,167	0,157
Desvio-padrão	0,105	0,110
Mediana	0,170	0,184

Fonte: Autoria própria (2017).

Ao se analisar a média e a mediana das duas categorias, pode-se verificar que os valores encontram-se muito próximos entre si. Dessa maneira, visualmente, não pode-se afirmar que a altura manométrica está influenciando positiva ou negativamente na relação de descarga.

Chegando a uma conclusão detalhada, nota-se que a mediana correspondente ao Sistema 2 é superior ao do Sistema 1. Como esse parâmetro determina o centro geométrico das medições, significa que há mais dados com relação de descarga elevados no poço tubular. Isso pode indicar que a maior altura manométrica está influenciando na relação de descarga, ou tão somente a presença de radiações maiores nesse período provocou uma coincidência.

Fazendo a análise estatística, aplicou-se o teste X^2 de normalidade para os valores de relação de descarga correspondente às duas categorias.

Para o Sistema 1, a distância X^2 resultou em 18,32, correspondendo um pvalor de $5,4 \cdot 10^{-3}$. Como o pvalor foi inferior ao nível de significância, não há distribuição normal para essa categoria. De forma similar, os dados do Sistema 2 obtiveram uma distância X^2 de 33,07 e um pvalor de $2,6 \cdot 10^{-5}$, mais distantes ainda da normalidade.

Com a confirmação estatística da ausência de normalidade para os dados das duas categorias, fez-se necessário aplicar o Teste U de Mann-Whitney. A medida estatística U resultou em 8.567, correspondendo a um pvalor de 0,25. Isso indica que afirmar que existe relação entre as categorias apresentaria um erro de 25%. Como o erro máximo determinado pela significância é de 5%, não há confirmação estatística de correlação entre as variáveis.

A ausência de correlação da altura manométrica pode se justificar pela pouca sensibilidade da vazão em relação à carga hidráulica, para bombas de deslocamento positivo, além da pouca variabilidade de dados. Entretanto, com fins de universalização, a variável foi mantida na modelagem.

Vale-se ressaltar que, como será utilizado um parâmetro que não possui correlação estatística nos dados de campo, o modelo pode apresentar um coeficiente de aderência mais reduzido.

5.4. SEGREGAÇÃO DOS DADOS PARA MODELAGEM

Os dados foram segregados em dois grupos, totalizando 168 para a aprendizagem (60%) e 112 para o teste (40%). A separação foi feita de forma estratificada, considerando os quatro grupos previamente estabelecidos e determinadas faixas de radiação, buscando uma homogeneidade na distribuição.

A distribuição da quantidade de dados para os grupos está disposta na Tabela 5, na Tabela 6, na Tabela 7 e na Tabela 8:

Tabela 5: Distribuição das medições para o Sistema 1A

Faixa de radiação (W/m²)	Aprendizagem	Teste
< 200	17	12
200 – 300	12	8
300 – 400	10	6
400 – 500	10	7
500 – 600	4	3
> 600	6	4

Fonte: Autoria própria (2017).

Tabela 6: Distribuição das medições para o Sistema 1B

Faixa de radiação (W/m²)	Aprendizagem	Teste
< 200	5	4
200 – 300	8	5
300 – 400	8	5
400 – 500	6	4
500 – 600	15	9
> 600	7	5

Fonte: Autoria própria (2017).

Tabela 7: Distribuição das medições para o Sistema 2A

Faixa de radiação (W/m²)	Aprendizagem	Teste
< 200	12	8
200 – 300	2	1
300 – 400	4	2
400 – 500	4	2
500 – 600	9	7
> 600	2	2

Fonte: Autoria própria (2017).

Tabela 8: Distribuição das medições para o Sistema 2B

Faixa de radiação (W/m²)	Aprendizagem	Teste
< 200	8	4
200 – 300	5	4
300 – 400	2	2
400 – 500	3	2
500 – 600	5	3
> 600	4	3

Fonte: Autoria própria (2017).

Com a definição da distribuição da quantidade de dados, a segregação foi feita de forma aleatória, dentro de cada um dos grupos apresentados.

5.5. MODELAGEM NUMÉRICA

A modelagem numérica foi feita a partir de três ramos diferentes: regressão linear (Modelo 1), linearizada (Modelo 2) e não-linear (Modelo 3). Todas foram utilizadas para a análise, já que apresentaram resultados satisfatórios.

5.5.1. Regressão linear

Após a aplicação do método de regressão linear, utilizou-se os mínimos quadrados para chegar à equação final, disposta na Equação 24:

$$\frac{Q}{Q_P} = -0,0310 + 0,552 * \frac{I}{1000} - 0,351 * \frac{Hm}{1000} \quad (24)$$

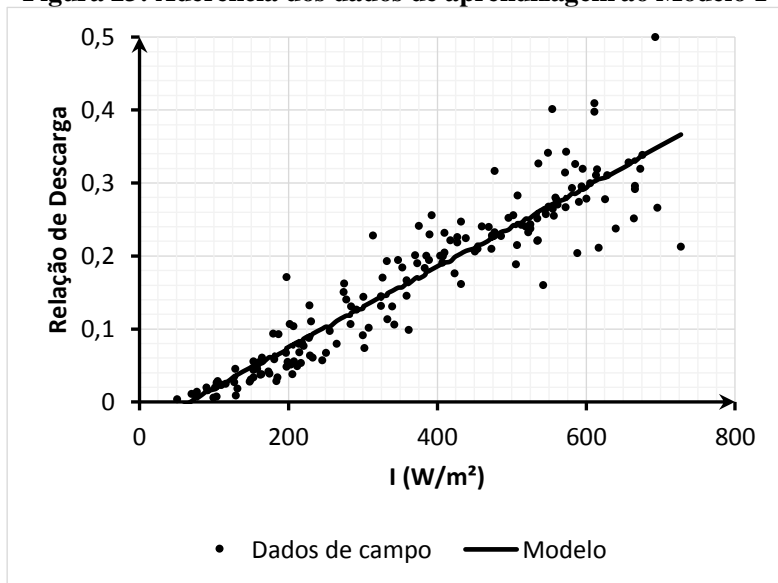
Ao analisar a equação, pode-se notar a pouca influência da altura manométrica na relação de descarga. O último encontra-se em uma ordem de grandeza de 10^{-1} . Ao se realizar o produto com os coeficientes, chega-se a uma ordem de grandeza de 10^{-3} , aproximadamente. Provavelmente, esse fato é decorrente da ausência estatística de correlação entre os dados de campo para esse fator.

5.5.1.1. Avaliação do Modelo 1 para o grupo de aprendizagem

A equação linear com duas variáveis apresentou um coeficiente de determinação de 0,865 para o grupo de aprendizagem, o que implica que 86,5% da variabilidade pode ser explicada pelo modelo ajustado. Como indicado, a análise do R^2 pode ser mascarada dependendo da quantidade de dados, o que torna as conclusões simplistas e muitas vezes incoerentes.

A aderência do modelo pode ser vista na Figura 23:

Figura 23: Aderência dos dados de aprendizagem ao Modelo 1



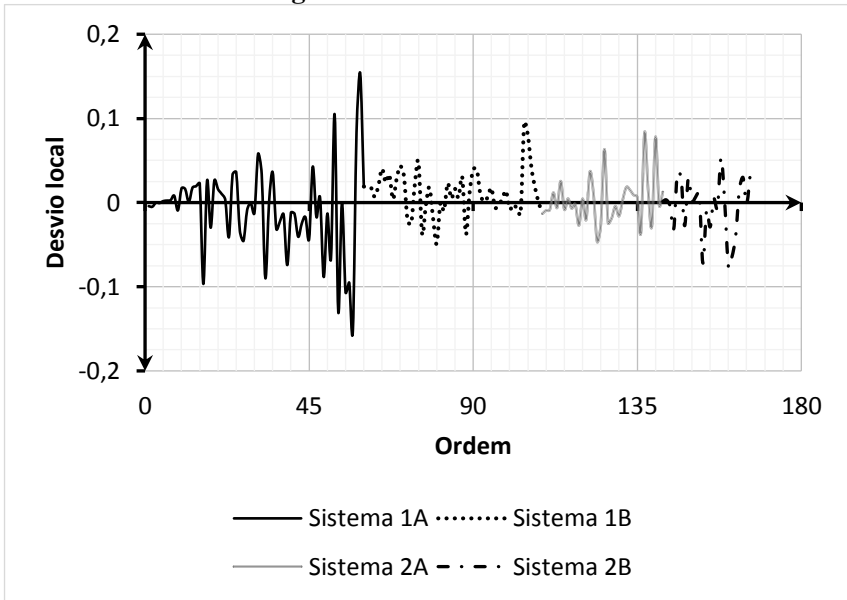
Fonte: Autoria própria (2017).

Como pode ser observado na Figura 23, o Modelo 1 possui uma boa aderência para radiações pequenas, apresentando uma dispersão maior para grandes insolações. Isso implica que há uma maior dificuldade de se estabelecer uma equação para grandes períodos de incidência solar. Como os dados foram retirados da cidade de Orleans, cuja radiação média máxima diária foi de aproximadamente 700 W/m^2 , deve-se ter cautela ao expandi-lo para outras regiões, mais próximas ao Paralelo do Equador.

A distância dos dados de campo para um modelo se caracteriza como desvio local. Essa medida permite avaliar, com melhor visualização, a aderência da curva à equação proposta.

Os desvios locais, segregados por categoria e dispostos em ordem crescente de radiação para cada uma delas, podem ser visualizados na Figura 24:

Figura 24: Desvios locais ordenados para o grupo de aprendizagem do Modelo 1



Fonte: Autoria própria (2017).

Por meio da Figura 24, é possível verificar que os desvios locais se alternam entre positivo e negativo. No total, foram 81 desvios negativos (52%), e 87 positivos (48%), mostrando uma homogeneidade do Modelo 1, sem tendência para nenhum lado dos dados, com representatividade de forma equilibrada.

O desvio local máximo foi de 0,154, observado principalmente em maiores radiações. Também pode ser analisado que o Modelo 1 possui erros mais sensíveis para o Sistema 2 do que para o Sistema 1.

O erro, em média, foi de 0,027, o que corresponde a 16% da média dos dados de campo do grupo de aprendizagem (0,165).

5.5.1.2. Avaliação do Modelo 1 para o grupo de teste

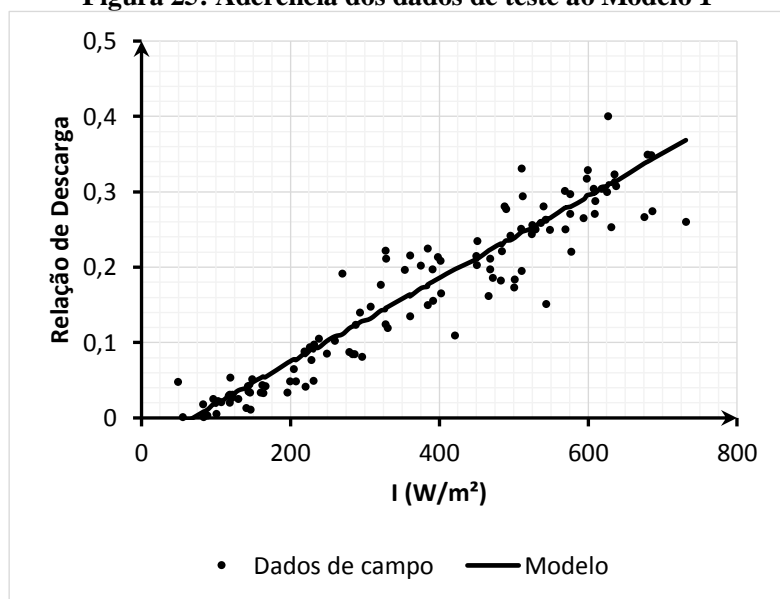
Para o grupo de teste, a aplicação do Modelo 1 ocasionou em um coeficiente de determinação de 0,881, superior ao do grupo de aprendizagem. O R^2 pode sofrer alterações devido à quantidade de dados, provável motivo dessa diferença. Dessa forma, não é reco-

mandável comparar esse parâmetro com grupos que distam em sua quantidade total.

Observando o valor do coeficiente de determinação isoladamente, verifica-se que 88,1% da variabilidade pode ser explicada pelo modelo ajustado. Isso é um forte indício do poder de generalização do Modelo 1, já que ele se mostra válido mesmo utilizando dados que não foram responsáveis pela sua criação.

A aderência do modelo para o grupo de teste pode ser vista na Figura 25:

Figura 25: Aderência dos dados de teste ao Modelo 1

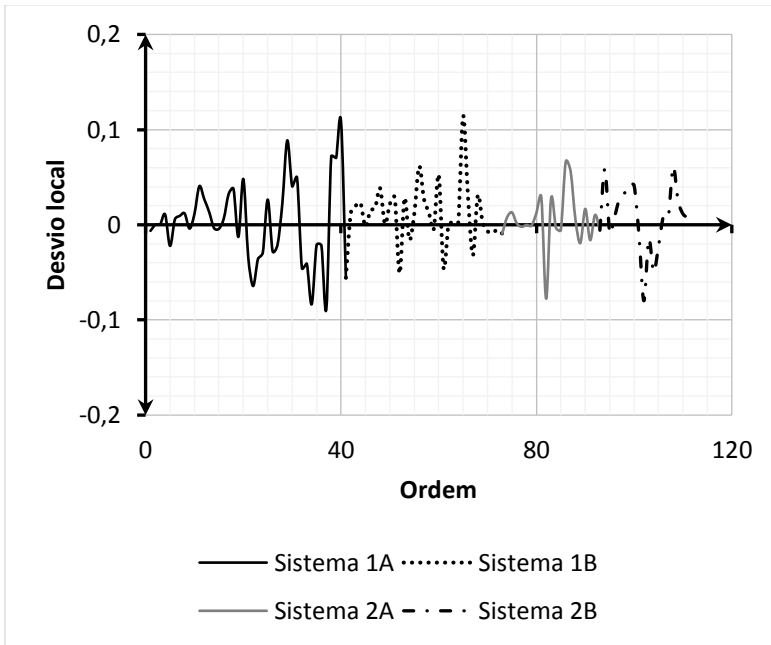


Fonte: Autoria própria (2017).

De forma análoga ao grupo de aprendizagem, as maiores aderências encontram-se para radiações menores, como visto na Figura 25. Isso se deve à maior dispersão dos dados em insolações elevadas. Comparando-se os dois grupos, verifica-se que o Modelo 1 se adequa bem às duas situações, reforçando a sua capacidade de generalização.

A análise dos desvios locais também é necessária para o grupo de teste. O comportamento dos erros pode ser visualizado na Figura 26:

Figura 26: Desvios locais ordenados para o grupo de teste do Modelo 1



Fonte: Autoria própria (2017).

Por meio da Figura 26, pode-se observar que os desvios locais foram visualmente menores no grupo de teste, em relação ao de aprendizagem. É possível verificar que raramente o erro foi superior a 0,1, mostrando uma eficácia do modelo ao representar os dados que não foram utilizados.

A alternância entre desvios positivos e negativos foi menos homogênea ao se comparar com o grupo de aprendizagem. Com os 112 dados para o teste, houve 45 negativos (40%) e 67 positivos (60%). Dessa forma, o Modelo 1 não foi tão centralizado para esse grupo.

O desvio local máximo foi de 0,114, inferior ao de aprendizagem; também observado em grandes radiações. Em média, o erro foi de 0,027, equivalente a 17% da média dos dados de campo (0,161).

Em suma, o Modelo 1 mostrou uma boa aderência para ambos os casos e não sofreu interferência negativa nos erros ao se aplicar

no grupo de teste. A alteração foi referente à homogeneidade dos erros, o que não alterou significativamente a eficácia do mesmo.

5.5.2. Regressão linearizada

A regressão linearizada se originou de uma adaptação da equação base, aplicando-se logaritmos para chegar a uma fórmula linear. Dessa forma, utilizou-se os mínimos quadrados para chegar na equação final, disposta na Equação 25:

$$\frac{Q}{Q_P} = 0,0185 * \frac{I^{1,575}}{1000} * Hm^{-0,115} \quad (25)$$

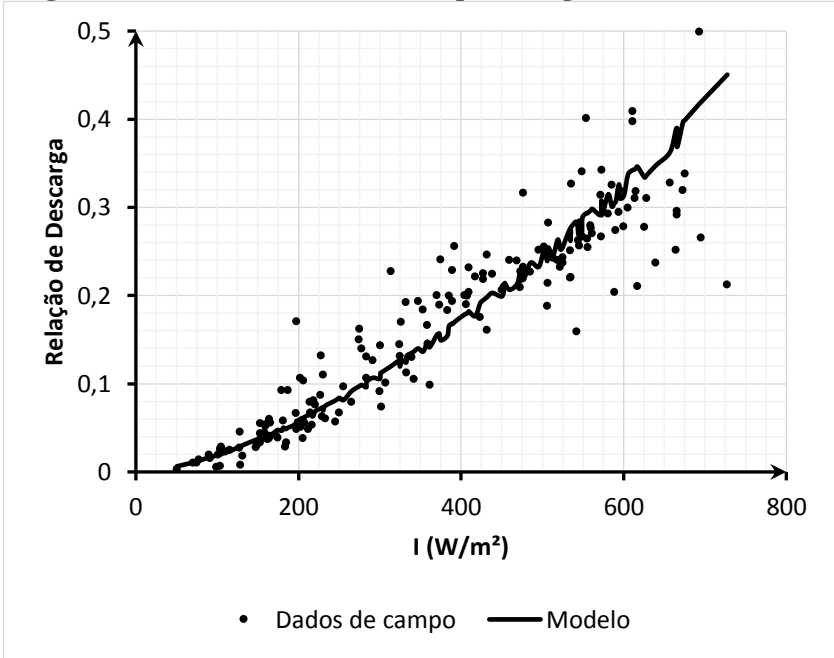
Em comparação com o Modelo 1, a altura manométrica do Modelo 2 se mostrou novamente com pouca significância. Ao se dobrar esse parâmetro, por exemplo, o valor da relação de descarga se alterará apenas em 8%. Como o Q/Q_P apresenta uma ordem de grandeza de 10^{-1} , a influência é praticamente nula.

5.5.2.1. Avaliação do Modelo 2 para o grupo de aprendizagem

O modelo de regressão linearizada com duas variáveis apresentou um coeficiente de determinação de 0,810 para o grupo de aprendizagem. Esse resultado implica que 81,0% da variabilidade é justificada pela equação, parcela inferior à do Modelo 1. Dessa forma, para o Modelo 2, o aumento da complexidade não implicou numa elevação da representatividade.

A aderência do Modelo 2 pode ser visualizada na Figura 27:

Figura 27: Aderência dos dados de aprendizagem ao Modelo 2



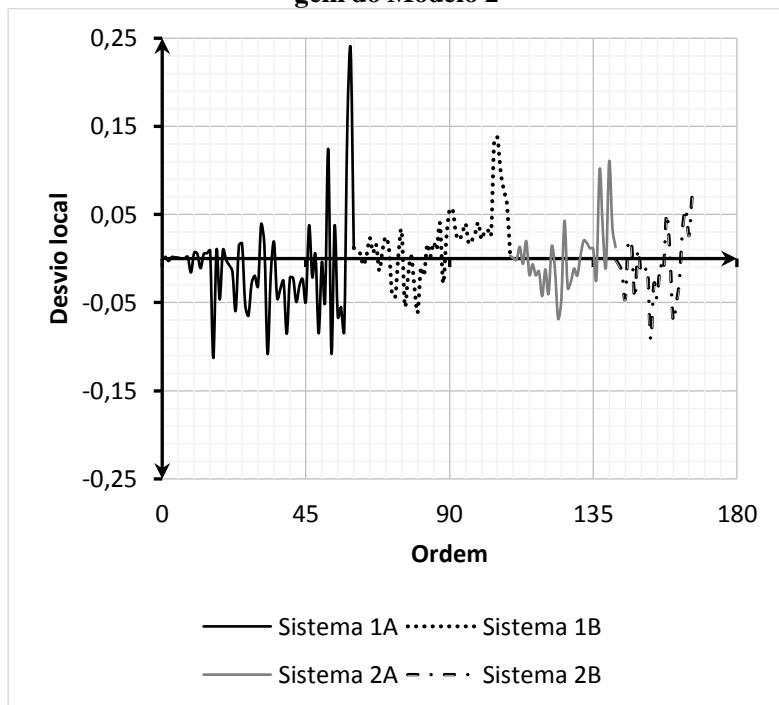
Fonte: Autoria própria (2017).

Observa-se, na Figura 27, que a aderência ao gráfico não é tão válida quanto à do Modelo 1, principalmente para radiações mais elevadas. Como há uma dispersão maior nessas condições, o Modelo 2 apresenta uma significância ainda menor para dados com maior insolação.

Vale-se ressaltar que as inflexões apresentadas na Figura 27 representam as diferentes alturas manométricas. Como já foi citado, esse parâmetro possui pouca influência no modelo final, como indicou a análise estatística.

A verificação do modelo linearizado foi feita também pela análise dos desvios locais, como mostra a Figura 28:

Figura 28: Desvios locais ordenados para o grupo de aprendizagem do Modelo 2



Fonte: Autoria própria (2017).

Por meio da análise da Figura 28, é possível verificar que há uma alternância no sinal dos desvios, de forma praticamente homogênea: 81 para os positivos (48%) e 87 para os negativos (52%). Isso indica que, como no Modelo 1, a o Modelo 2 foi feito de forma equilibrada.

Com relação aos erros, verifica-se um aumento em função da radiação. Essa proporção se torna mais elevada do que no Modelo 1, possivelmente devido ao caráter exponencial apresentado no modelo, intensificando os valores maiores e amenizando os menores.

A incidência de desvios elevados se deu novamente Sistema 1, mostrando que o Modelo 2 também se adequa melhor ao Sistema 2.

O desvio máximo foi de 0,238, enquanto o médio foi de 0,032 (20% de erro em relação à média de 0,165). Comparando-se com o

Modelo 1, nota-se que há uma variabilidade maior, tanto em média, quando nos extremos.

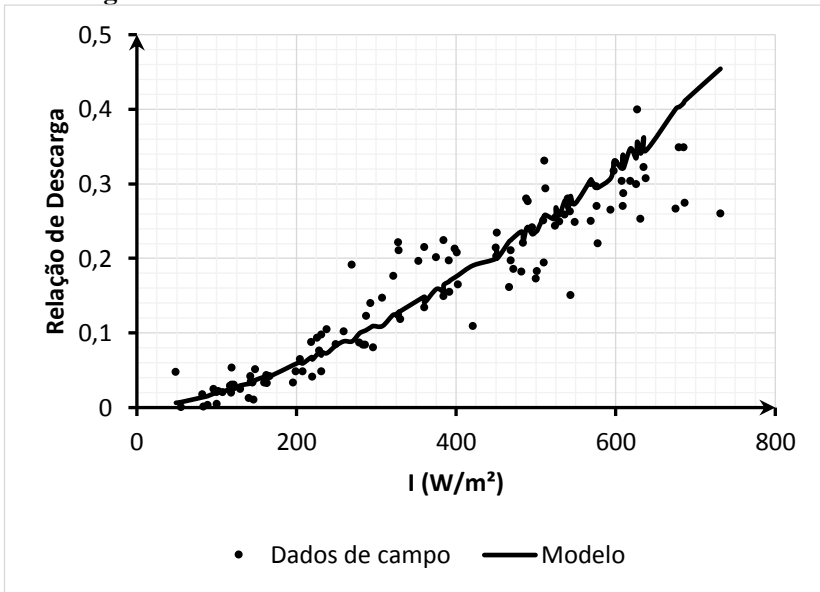
5.5.2.2. Avaliação do Modelo 2 para o grupo de teste

Para o grupo de teste, a aplicação do Modelo 2 ocasionou em um coeficiente de determinação de 0,813, praticamente idêntico ao do grupo de aprendizagem. Novamente, vale-se ressaltar que não é válida a comparação numérica simples do R^2 para grupos com amostras distintas.

Excluindo-se a comparação e analisando o coeficiente de determinação apenas para o grupo de teste, nota-se que 81,3% da variabilidade pode ser explicada pelo Modelo 2. Assim, mesmo com uma representatividade menor que o Modelo 1, o Modelo 2 apresenta uma boa capacidade de generalização.

Pode-se observar a aderência dos dados de teste com o modelo em questão na Figura 29:

Figura 29: Aderência dos dados de teste ao Modelo 2

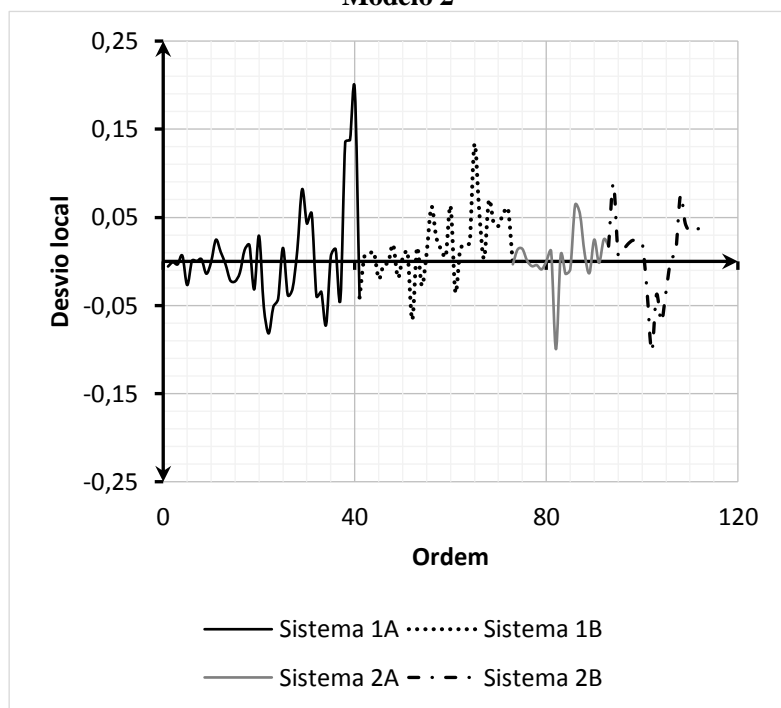


Fonte: Autoria própria (2017).

Como no grupo de aprendizagem, o Modelo 2 consegue representar bem os valores para pequenas radiações, mas não apresenta uma boa aderência para valores mais elevados, como mostra a Figura 29. O modelo possui uma boa generalização, em contraponto à sua representatividade inferior à do Modelo 1.

Da mesma forma que nas análises anteriores, é válido observar o comportamento dos desvios locais para inferir na qualidade ou não do modelo. Os desvios se encontram na Figura 30:

Figura 30: Desvios locais ordenados para o grupo de teste do Modelo 2



Fonte: Autoria própria (2017).

Ao observar a Figura 30, pode-se verificar uma diminuição da intensidade dos desvios do grupo de teste, em relação ao de aprendizagem. Em nenhum momento o erro ultrapassou 0,2, confirmando novamente a boa capacidade de generalização do Modelo 2.

A homogeneidade dos desvios não foi elevada quanto no grupo de aprendizagem. Do total, 44 medições apresentaram erro negativo (39%), enquanto que 68 foram positivos (61%).

O desvio local máximo foi de 0,195, menor do que o de aprendizagem. Pode-se analisar, pelo gráfico, que o mesmo ocorreu novamente em grandes radiações e para o Sistema 1. Portanto, o Modelo 2 é aplicado melhor no Sistema 2, com uma minimização dos erros.

O desvio local médio foi de 0,031, o que representa um erro de 20 % em relação à média de 0,161, mais elevado do que no grupo de aprendizagem. Nota-se que o erro médio é proporcionalmente inferior ao apresentado no grupo de aprendizagem, mostrando sua eficácia.

De forma resumida, o Modelo 2 mostrou uma aderência razoável para o grupo de aprendizagem e teste, apesar de apresentar erros maiores do que no Modelo 1. Como já foi explicado, o aumento da complexidade não melhorou a representatividade, reduzindo-a, pelo contrário.

5.5.3. Regressão não linear

O Modelo 3 consistiu em uma regressão não linear, chegando aos mínimos quadrados pelo método de Newton.

Para o início do método, foram adotados valores iniciais definidos pela ferramenta *Solver* do Excel, minimizando as diferenças quadráticas. Dessa forma, os valores teriam menos chances de divergência já que seriam próximos do original.

Os dados iniciais encontram-se na Tabela 9:

Tabela 9: Valores iniciais dos coeficientes para as iterações

Coeficiente	Valor inicial
y	0,91242
k	0,05199
x	0,00100

Fonte: Autoria própria (2017).

A partir dos valores iniciais apresentados na Tabela 9, não foi possível a obtenção de convergência. Como solução, realizou-se um aprimoramento da primeira estimativa com uma função interpolação, que passasse por três pontos aleatórios dos dados de campo. Após

218 interações, com um resíduo de $6,009 \cdot 10^{-13}$, pôde-se atualizar os valores iniciais, como mostra a Tabela 10:

Tabela 10: Valores iniciais após a interpolação

Coefficiente	Valor inicial
y	0,92065
k	1,15586
x	-1,19924

Fonte: Autoria própria (2017).

Pode-se observar na Tabela 10 que o valor inicial de x apresentou uma inconsistência com a bibliografia, porque provoca uma correlação positiva na relação de descarga. Isso ocorre devido à própria ausência de relação estatística com os dados de campo.

Com as derivadas numéricas calculadas e as iterações realizadas, foi possível chegar a uma equação preliminar, definida após 11 tentativas, como mostra a Equação 26:

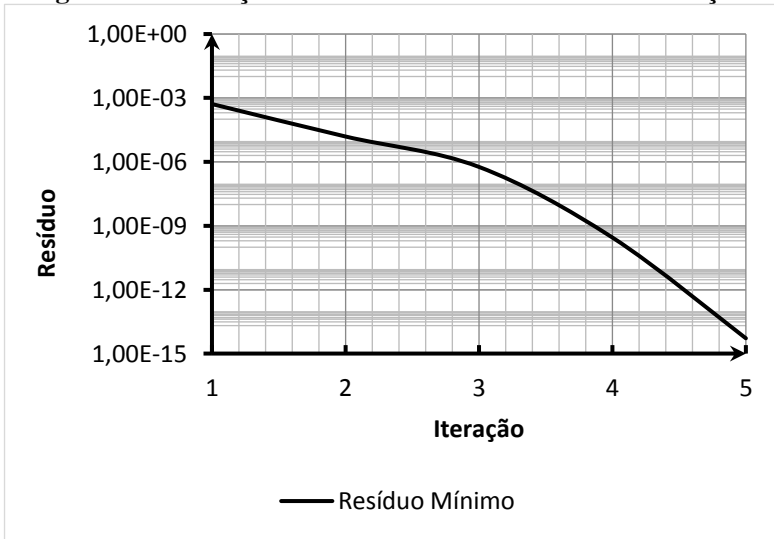
$$\frac{Q}{Qp} = \frac{I^{0,879}}{1000} - \frac{1,1192}{Hm^{10,76}} \quad (26)$$

Como pode ser observado na Equação 26, o termo referente à altura manométrica tende a zero, devido ao elevado expoente no denominador. Assim, o ajuste não linear confirma a tendência de campo, em que a altura manométrica não influencia na relação de descarga, para os dados coletados.

Tendo em vista a ausência de influência inicial da altura manométrica, o modelo foi ajustado, estabelecendo uma restrição para o coeficiente x, fazendo com que o mesmo fosse 0,001. Essa restrição mantém a correlação negativa entre a carga hidráulica e a relação de descarga, garantindo a base conceitual e bibliográfica. O coeficiente foi escolhido, pois representa a máxima ordem de grandeza a qual o ajuste não incorre em erros elevados.

O Modelo 3, com a restrição para o expoente da altura manométrica e com os valores iniciais da Tabela 9, foi obtido após cinco iterações. O resíduo final mínimo, foi de $5,20 \cdot 10^{-15}$, indicando baixíssima variação de um coeficiente para outro na última tentativa.

É possível verificar a queda dos resíduos durante as iterações, por meio da Figura 31:

Figura 31: Oscilação do resíduo mínimo durante as iterações

Fonte: Autoria própria (2017).

Por meio da Figura 31, é possível observar que a ordem de grandeza do resíduo máximo diminui exponencialmente a cada iteração, mostrando uma convergência no processo.

A equação final a ser utilizada pelo Modelo 3 encontra-se representada na Equação 27:

$$\frac{Q}{Qp} = \frac{I^{0,914}}{1000} - 0,0515 * Hm^{0,001} \quad (27)$$

Com uma análise preliminar de Equação 27, ressalta-se que, mesmo com a restrição apresentada ao expoente da altura manométrica, este parâmetro não apresenta influência significativa no Modelo 3. Portanto, o termo referente à carga hidráulica é praticamente uma constante na determinação da relação de descarga.

Outra observação é feita por meio do expoente da radiação. Como o mesmo é relativamente próximo de 1, os resultados deverão se assemelhar aos do Modelo 1.

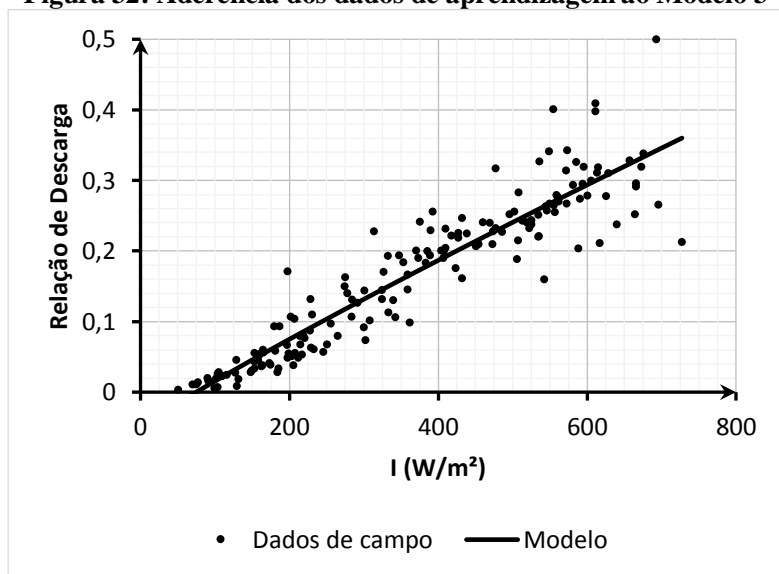
5.5.3.1. Avaliação do Modelo 3 para o grupo de aprendizagem

O Modelo 3, ao ser aplicado no grupo de aprendizagem, apresentou um coeficiente de determinação de 0,867, praticamente idêntico ao da versão preliminar sem restrições. Isso revela que o estabelecimento de limite para o expoente da altura manométrica não alterou a influência do modelo na variabilidade.

Em comparação com os outros métodos, utilizando o mesmo número de dados, o Modelo 3 obteve o maior coeficiente de determinação, apesar de ser semelhante ao do Modelo 1.

É possível verificar a aderência dos dados de aprendizagem na Figura 32:

Figura 32: Aderência dos dados de aprendizagem ao Modelo 3



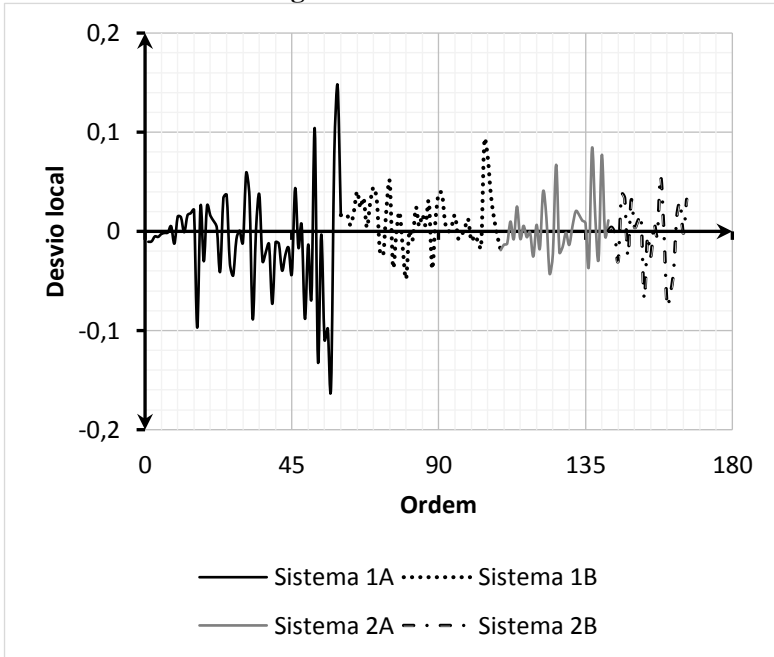
Fonte: Autoria própria (2017).

Por meio da análise da Figura 32, constata-se uma forte semelhança com o Modelo 1. A aderência segue maior para dados de menor intensidade de insolação, enquanto não consegue abranger maiores radiações devido à dispersão.

Como conclusão prévia, observa-se que a complexidade na elaboração de um modelo baseado em regressão não linear não foi suficiente para obter uma representatividade maior. Foi verificado que o Modelo 3 apresentou resultados equivalentes com relação aos modelos mais simples, com relação à aderência.

De forma análoga ao que foi feito nos outros modelos, analisaram-se também os desvios locais. O comportamento ordenado encontra-se na Figura 33:

Figura 33: Desvios locais ordenados para o grupo de aprendizagem do Modelo 3



Fonte: Autoria própria (2017).

Como pode ser visto na Figura 33, o comportamento dos desvios foi equivalente ao do Modelo 1. Os erros apresentaram 82 valores negativos (49%) e 86 positivos (51%). Dessa forma a homogeneidade desse modelo também é confirmada.

Com relação ao desvio local máximo, o valor apresentado foi de 0,157, praticamente o mesmo do Modelo 1 e também para elevada radiação do Sistema 1.

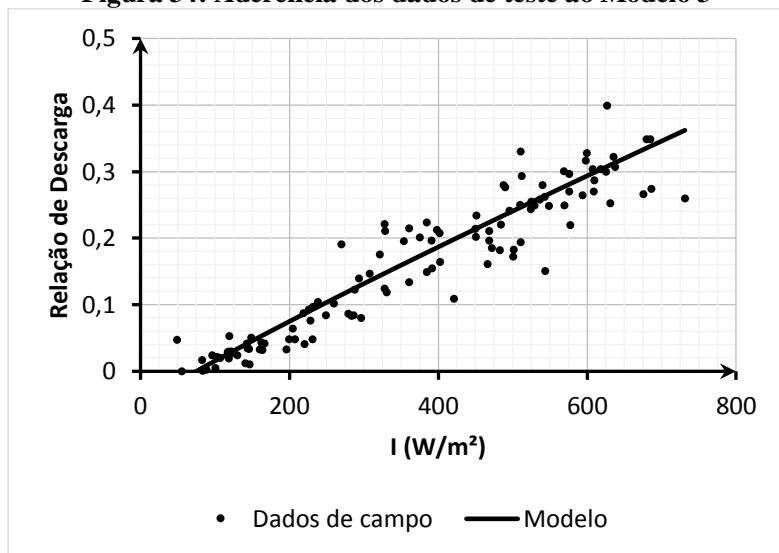
O erro médio foi de 0,027, com 16% em relação à média dos dados de campo do grupo de aprendizagem (0,165). Os valores também foram equivalentes aos do Modelo 1.

5.5.3.2. Avaliação do Modelo 3 para o grupo de teste

A aplicação do Modelo 3 para o grupo de teste ocasionou um coeficiente de determinação de 0,881, também superior ao do grupo de aprendizagem e equivalente ao do teste do Modelo 1.

A aderência do Modelo 3 para o grupo de teste pode ser vista na Figura 34:

Figura 34: Aderência dos dados de teste ao Modelo 3

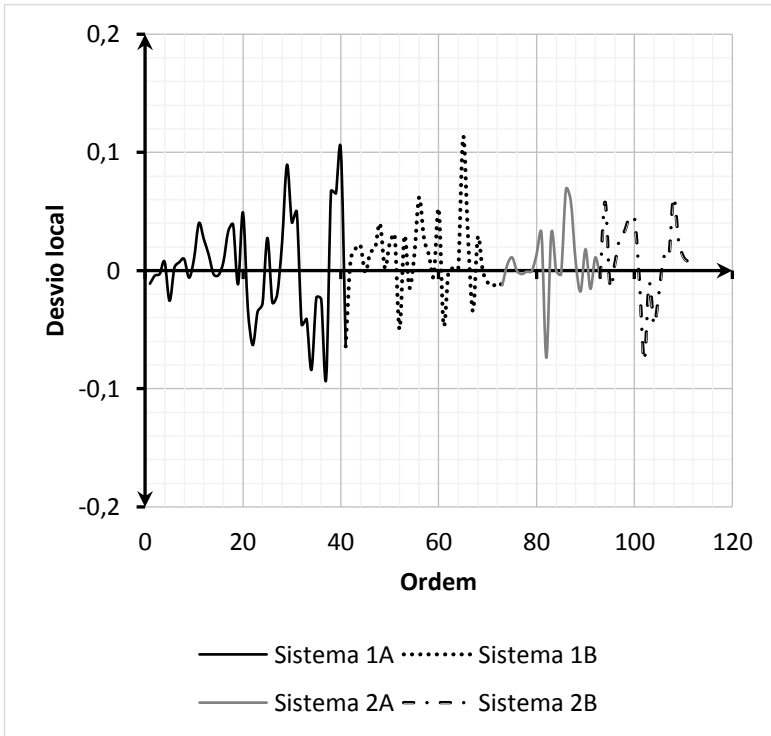


Fonte: Autoria própria (2017).

A análise da Figura 34 permite inferir que, para o grupo de teste, o Modelo 3 repete as condições já vistas, com maiores aderências para baixas radiações e menores para as maiores. Como nos modelos anteriores, a capacidade de generalização está sendo observada, já que a equação se adere tanto para os dados de aprendizagem, quanto para os de teste.

Complementando as análises já apresentadas, é possível verificar o comportamento dos desvios locais, como se observa na Figura 35:

Figura 35: Desvios locais ordenados para o grupo de teste do Modelo 3



Fonte: Autoria própria (2017).

Por meio da Figura 35, é possível verificar uma queda nos desvios, em relação ao grupo de aprendizagem. A alternância de desvios foi maior, com 49 negativos (44%) e 63 positivos (56%). O Modelo 3 foi o que mais garantiu a homogeneidade dos erros, com relação ao grupo de teste, mas com pouca diferença para o Modelo 1.

O desvio local máximo foi de 0,113, no ponto de superior radiação do Sistema 1. O erro médio foi de 0,027, representando 17% da média dos dados do grupo de teste (0,161).

De forma resumida, o Modelo 3 apresentou praticamente os mesmos resultados que os do Modelo 1. Ele é eficaz, mas a maior complexidade talvez não justifique sua utilização, ao primeiro modo.

5.5.4. Análise comparativa dos modelos

Após a realização de todos os cálculos, pôde-se construir uma tabela resumo para uma melhor comparação visual e facilitar a escolha do melhor modelo.

Os dados resumidos e compilados encontram-se na Tabela 11:

Tabela 11: Resumo dos modelos apresentados

Modelo	Aprendizagem			Teste		
	R ²	Erro máximo	Erro médio	R ²	Erro máximo	Erro médio
Modelo 1	0,865	0,154	0,027	0,881	0,114	0,027
Modelo 2	0,810	0,238	0,032	0,813	0,195	0,031
Modelo 3	0,867	0,156	0,027	0,881	0,113	0,027

Fonte: Autoria própria (2017).

Como já foi apresentado paulatinamente nas discussões de cada um dos modelos, todos foram representativos tanto para o grupo de aprendizagem, quando para o de teste. A segregação estratificada pode ter sido a causa da semelhança e equivalência nos dados dos diferentes conjuntos.

Observando os resultados, observa-se que o Modelo 2 é o menos adequado para representar os dados de campo, tanto no grupo de aprendizagem, quanto no de teste. O seu comportamento exponencial o faz perder aderência em radiações maiores com mais intensidade do que os demais. Além disso, os desvios, em média, foram mais elevados, e os pontos extremos mais significativos.

O Modelo 1 e o Modelo 3 apresentaram praticamente os mesmos resultados, como já foi citado. Os dois, portanto, seriam os mais adequados para representar a oscilação da relação de descarga em função da radiação e da altura manométrica.

Devido à complexidade do Modelo 3, suger-se-ia novos testes para verificar se, de fato, sua elaboração é justificável.

Vale-se ressaltar que a ausência de variação na altura manométrica pode ter contribuído significativamente para a aderência não tão próxima de 1, além da proximidade entre os modelos 1 e 3.

5.6. APLICAÇÃO DOS MODELOS

Os três modelos desenvolvidos neste trabalho foram elaborados de forma estatística a partir de bombas vibratórias. Para verificar a capacidade de expansão, aplicaram-se os modelos utilizando dados de outros trabalhos.

5.6.1. Primeiro teste

Um dos trabalhos avaliados foi o de Zanirato, Moura, e Cordeiro (2011); que avaliaram a atividade de uma bomba centrífuga na cidade de Florianópolis. Os autores utilizaram um conjunto da marca *SunPumps Brushless DC Submersible*, modelo SCS, com 75V. Para uma altura manométrica de 39,6, a vazão plena foi aproximadamente 18 galões por minuto. Utilizando 9 horas de insolação em Florianópolis, a descarga diária foi equivalente a 39,794 m³/dia.

Com os dados apresentados no trabalho dos autores acima, pôde-se aplicar os três modelos elaborados neste certame, conforme mostra a Tabela 12:

Tabela 12: Aplicação dos modelos no trabalho de Zanirato, Moura e Cordeiro (2011)

Modelo	Vazão (m ³ /dia)	Erro
Real medido	14,600	–
Equação dos autores ¹	14,723	0,84%
Modelo 1	14,611	0,07%
Modelo 2	16,745	14,7%
Modelo 3	14,678	0,54%

Fonte: Autoria própria (2017).

Como pode ser observado na Tabela 11, o Modelo 1 e o Modelo 3 apresentaram um resultado muito próximo da realidade, mesmo para um experimento que utilizou bombas centrífugas e com radiações e alturas manométricas mais elevadas do que as realizadas neste trabalho.

A boa aderência para o valor medido pelos autores é um indício que as equações desenvolvidas nesses casos podem ser expandi-

¹ Página 42, Equação 1.

das, independente do tipo de bombeamento. Sugere-se, a partir daí, um estudo mais aprofundado, com maior quantidade de dados.

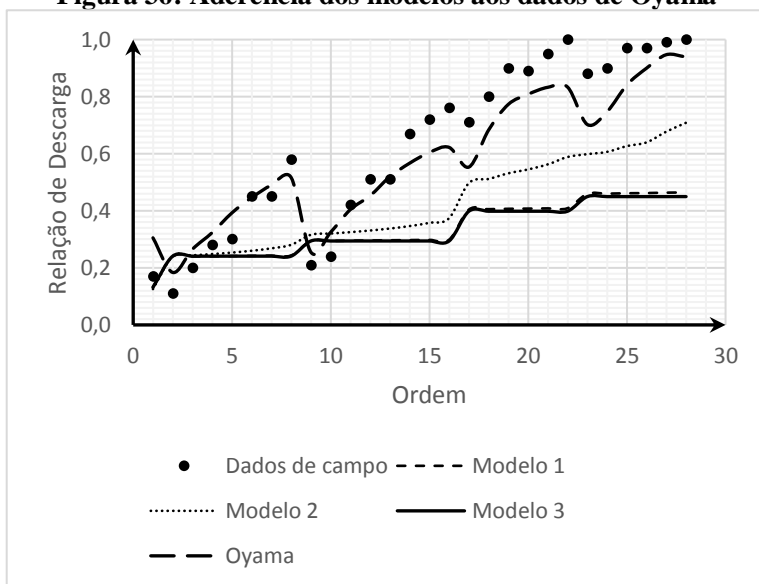
5.6.2. Segundo teste

Oyama (2008) desenvolveu um modelo numérico baseado em uma bomba centrífuga, utilizando uma série com diferentes alturas manométricas e radiações.

Os três modelos desenvolvidos neste trabalho foram aplicados em 28 dados apresentados pelo autor, buscando uma variabilidade de altura manométrica e radiação.

A aderência dos modelos aos resultados, dispostos de forma ordenada de radiação, podem ser visualizados na Figura 36:

Figura 36: Aderência dos modelos aos dados de Oyama



Fonte: Autoria própria (2017).

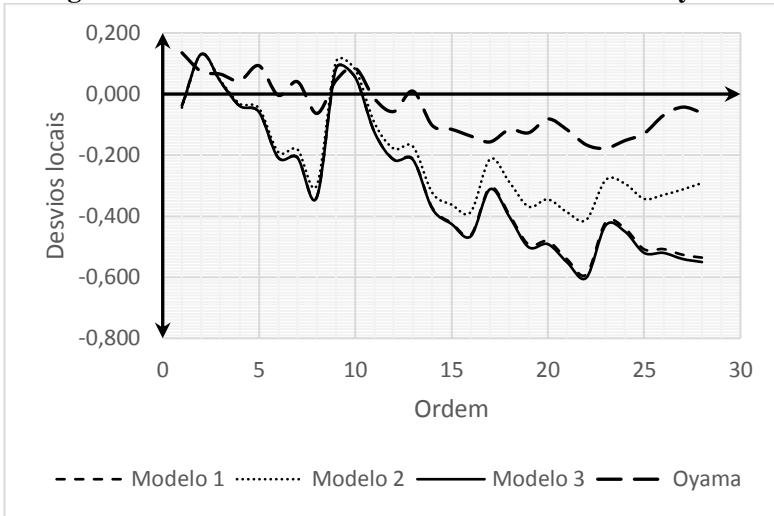
Como pode ser observado na Figura 36, os modelos não se adequam aos dados obtidos por Oyama, apresentando baixa aderência, principalmente em radiações mais elevadas. Mesmo a equação do próprio autor não é indicada em insolações maiores.

Dos modelos desenvolvidos, o que mais mostrou proximidade foi o Modelo 2, em contraponto aos estudos obtidos. Isso pode ter

ocorrido porque o mesmo foi o único que apresentou um comportamento exponencial, mais adequado com o comportamento dos dados de campo.

A análise dos desvios locais pode ser visualizada na Figura 37:

Figura 37: Desvios locais dos modelos aos dados de Oyama



Fonte: Autoria própria (2017).

Como já foi discutido, os desvios se tornam maiores à medida que a insolação se torna mais elevada. Por meio da Figura 37, ressalta-se a ausência de alternância entre valores positivos e negativos em qualquer modelo, mesmo o do autor. Assim, nenhum modelo está representando a realidade com uma homogeneidade.

Numericamente, os desvios máximos e médios estão mostrados na Tabela 13:

Tabela 13: Aplicação dos modelos no trabalho de Oyama (2008)

Modelo	Erro máximo	Erro médio
Oyama	0,178	0,089
Modelo 1	0,591	0,313
Modelo 2	0,411	0,234
Modelo 3	0,602	0,318

Fonte: Autoria própria (2017).

O modelo de Oyama, com os dados apresentados, apresentou um erro médio de 0,089, que representa 14% em relação à média dos dados em campo (0,626). Dentre os demais, o Modelo 1 se distanciou 50%, o Modelo 2, 37% e o Modelo 3, 51%.

A partir dessa análise, nota-se que os modelos aplicados não se enquadram na configuração da bomba centrífuga de Oyama. Dessa forma, a capacidade de expansão das equações desenvolvidas se torna questionável, principalmente em radiações maiores.

6. CONCLUSÕES

Com os dados obtidos para um conjunto fotovoltaico formado por bombas vibratórias, na cidade de Orleans, pode-se confirmar a correlação positiva entre a radiação e vazão, como descrito na bibliografia. Com relação à altura manométrica, não foi verificada uma associação com a vazão, provavelmente devido à falta de variabilidade de dados e a pouca sensibilidade das bombas vibratórias com a carga hidráulica.

Essa oscilação influenciou diretamente a vazão de bombeamento durante os períodos medidos e, portanto, o nível do reservatório de armazenamento. Dessa forma, há grande possibilidade de falta d'água devido à utilização da vazão plena para o dimensionamento dos reservatórios. Isso ocorre porque, a partir dos dados avaliados, a relação de descarga oscilava quase sempre abaixo de 0,50; isto é, com menos de 50% da vazão contida na CCB. Como um dos objetivos da tecnologia fotovoltaica para fins de abastecimento de água é permitir que populações isoladas obtenham um suprimento em quantidade; esse fator pode não garantir o atendimento das necessidades dessas comunidades.

A partir dos dados, puderam-se construir três modelos. O Modelo 1 se mostrou simples e eficaz, representando bem a realidade. O Modelo 3 apresentou bons resultados, mas seus expoentes o tornaram próximo do Modelo 1, não justificando sua execução, a princípio. O Modelo 2 se distanciou mais dos dados de Orleans, mas apresentou um comportamento exponencial que se adequou mais ao comportamento do trabalho de Oyama, com bombas centrífugas.

A complexidade não justificada do Modelo 3 não deve ser usada como argumento definitivo para sua não utilização. Como visto no trabalho de Oyama, o comportamento exponencial foi significativo para uma melhor aderência. Ao se utilizar mais dados, uma variabilidade maior de altura manométrica, além de bombas centrí-

fuga, podem ser obtidos coeficientes mais satisfatórios e, por conseguinte, mais representativos.

Todos os modelos refletiram a correlação positiva entre radiação e vazão, mas o termo referente à altura manométrica se mostrou praticamente insignificante. Dessa forma, as equações apresentadas podem acarretar em erro para alturas manométricas diferentes das desenvolvidas em Orleans (aproximadamente 11m e 20m).

Os modelos apresentaram uma maior dificuldade de aderência para radiações maiores, com maior dispersão. Sua aplicabilidade em regiões com maior insolação deve ser avaliada com cuidado. Sobre tudo, pode-se pensar no desenvolvimento de modelos mais complexos e compostos nesses casos.

Para trabalhos futuros, sugere-se buscar uma maior variabilidade na altura manométrica. Assim, os modelos construídos poderão contemplar, realmente, variáveis múltiplas. Além disso, pode-se testar dados com diferentes equipamentos, buscando uma equação genérica que contemple tanto bombas centrífugas quanto vibratórias.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABU-ALIGAH, M. -. Design of Photovoltaic Water Pumping System and Compare it with Diesel Powered Pump. *Jordan Journal Of Mechanical And Industrial Engineering*. [s.i], p. 273-280. jun. 2011.

ANAUGER, 2017. Disponível em <<http://www.anauger.com.br/index.php/linha-anauger-solar/anauger-solar-p100>> Acesso em 07 de junho de 2017.

ANDRADE, E. H. P.; BEZERRA, L. D. S.; ANTUNES, F. L. M. Sistema de bombeamento de água com energia solar fotovoltaica utilizando motor de indução trifásico. 2008. Disponível em: <<http://www.nipeunicamp.org.br/agrener/anais/2008/Artigos/53.pdf>>. Acesso em: 30 abr. 2017.

DesviANEEL, 2005 - Atlas de energia elétrica do Brasil / Agência Nacional de Energia Elétrica. 2ª edição - Brasília; ANEEL, 2005, 243p.

APOGEE, 2017. Disponível em <<https://www.apogeeinstruments.com/content/SP-110-manual.pdf>> Acesso em 07 de junho de 2017.

BARUAH, Mondipa. *Hydrochemical study of Groundwater in parts of Guwahati*. 2009. 297 f. Tese (Doutorado) - Faculty of Science, Department of Chemistry, University of Guwahati, Guwahati, 2009.

BRASIL. Constituição (1997). Lei nº 9433, de 08 de janeiro de 1997. Lei das Águas. [s.i.]

BOITRAGO, Samuel Alves et al. CAPTAÇÃO DE ÁGUA POR SISTEMA FOTOVOLTAICO PARA CONSUMO HUMANO NA LOCALIDADE RURAL ILHA CAIAPÓS, SÃO ROMÃO - MINAS GERAIS. **Rec - Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, [s.l.], v. 12, n. 2, 4 jul. 2016. Universidade Federal de Goiás. <http://dx.doi.org/10.5216/reec.v12i2.37490>.

CAMPANA, Pietro Elia; LI, Hailong; YAN, Jinyue. *Dynamic modelling of a PV pumping system with special consideration on water demand*. *Applied Energy*, [s.l.], v. 112, p.635-645, dez. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.12.073>.

CAMPBELL SCIENTIFIC, 2017. Disponível em <<https://www.campbellsci.com.br/cr200x-series>> Acesso em 07 de junho de 2017.

CARVALHO, Robson Flores de et al. Projeto e construção de um motor de pistões axiais de vazão fixa. 2006

CARVALHO, Rodrigo Delalibera. Aspectos econômicos e ambientais em sistemas de abastecimento de água usando energia solar fotovoltaica e captação subterrânea. 2016. 105 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Ambiental, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016.

DAL BEM, Julio César Trevisan et al. SOLUÇÃO PARA BOMBEAMENTO DE ÁGUA EM PROPRIEDADES RURAIS UTILIZANDO ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA. *Revista Brasileira de Energia Solar*, [s.i], v.VII, n. 1, p.50-57, jul. 2016.

DJURIN, Bojan; MARGETA, Jure; GLASNOVIC, Zvonimir. *PV Power for Urban Water Supply*. *International Journal Of Energy Science*. [s.i], p. 131-139. 2011.

FEDRIZZI, M. C.; RIBEIRO, F. S.; ZILLES, R.. Bombeamento de água no meio rural, análise econômica de duas configurações fotovoltaicas e uma elétrica convencional. *Avances En Energías Renovables y Medio Ambiente*, [s.i], v. 13, n. 4, p.117-123, 2009

FEDRIZZI, Maria Cristina; SAUER, Ildo Luis. Bombeamento solar fotovoltaico, histórico, características e projetos. ***Proceedings of the 4th Encontro de Energia no Meio Rural***, 2002.

FISCHER, Hugo B.. *Transport Models for Inland and Coastal Waters*.: [s.l.] Elsevier, 1981. 542 p.

FRAIDENRAICH, Naum; VILELA, Olga de Castro. Avanços em sistemas de abastecimento de água com bombeamento fotovol-

taico para comunidades rurais. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, [s.i.], v. 4, n. 3, p.69-81, jul./set. 1999.

GHONEIM, A.a.. Design optimization of photovoltaic powered water pumping systems. *Energy Conversion And Management*, [s.I.], v. 47, n. 11-12, p.1449-1463, jul. 2006. Elsevier BV.

GUIMARÃES, Ana Paula Cardoso. Estimativa de parâmetros da camada atmosférica para cálculo da irradiação solar incidente na superfície terrestre. 2003. 185 f. Tese (Doutorado) - Curso de Ciências em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2003.

IBGE, 2017. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Censo Demográfico 2010. Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão. Rio de Janeiro. 2017. – Disponível em < <http://cidades.ibge.gov.br/painel/painel.php?lang=&codmun=421170> >. Acesso em 30 de maio de 2017.

INCONTROL, 2017. Disponível em: < http://www.incontrol.ind.br/produtos.php?id=26&id_categoria=8 > ; Acesso em 07 de junho de 2017.

MARQUES, Derivan Dutra et al. Variação da radiação solar no estado do Amapá: estudo de caso em Macapá, pacuí, Serra do Navio e Oiapoque no período de 2006 a 2008. *Revista Brasileira de Meteorologia*, [s.i.], v. 27, n. 2, p.127-138, nov. 2011.

MONDARDO, Renata Iza. Avaliação da filtração em margem como pré-tratamento à filtração direta descendente na remoção de células de cianobactérias e saxitoxinas. 2009. 291 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Ambiental, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.

NASSAR, Silvia M., WRONSCKI, Vilson R., OHIRA, Masanao et al. **SEstatNet** - Sistema Especialista para o Ensino de Estatística na Web. URL de acesso: <http://sestatnet.ufsc.br> . Florianópolis - SC, Brasil. Acesso em 15 set. 2017

NATIONAL RESEARCH COUNCILS (Estados Unidos). *Public water supply distribution systems: assessing and reducing risks*. Washington, D.C: The National Academies Press, 2005.

NEREUS, 2017. Núcleo de Economia Regional e Urbana da Universidade de São Paulo. Disponível em <<http://www.usp.br/nereus/?dados=brasil>>. Acesso em 31 de maio de 2017.

NESBITT, Brian. *Handbook of Pumps and Pumping*. [s.i.]: Elsevier Science, 2006. 424 p

NIEDZIALKOSKI, Rosana Kraus et al. Avaliação de um sistema fotovoltaico utilizado para o bombeamento de água em Cascavel/PR. *Acta Iguazu, Cascavel*, v. 1, n. 3, p.44-49, 2012

OULD-AMROUCHE, S.; REKIOUA, D.; HAMIDAT, A.. Modelling photovoltaic water pumping systems and evaluation of their CO2 emissions mitigation potential. **Applied Energy**, [s.l.], v. 87, n. 11, p.3451-3459, nov. 2010. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.05.021>.

OYAMA, Paulo Takashi. Vazão de uma motobomba acionada por painéis fotovoltaicos. 2008. 92 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2008

PEREIRA, Samara Teixeira et al. Estimativa da radiação solar global para a região de Pedra Azul. *Enciclopédia Biosfera*, Goiânia, v. 6, n. 11, p.1-9, 2010.

PETERS, Sérgio; SZEREMETA, Júlio Felipe **Cálculo Numérico Computacional**. Disponível em: <<http://sergiopeters.prof.ufsc.br/livro-calculo-numeric-computacional/>>. Acesso em: 13 out. 2017.

PORTO, Rodrigo de Melo. *Hidráulica Básica*. 4. ed. São Carlos: Eesc-usp, 2006. 519 p.

PINHO, J.T.; GALDINO, M.A.; **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. Grupo de Trabalho de Energia Solar - GTES, CEPEL - CRESESB, Rio de Janeiro, 2014, 530p.

QUININO, Roberto C.; REIS, Edna A.; BESSEGATO, Lúcio F. O Coeficiente de Determinação R^2 como Instrumento Didático para Avaliar a Utilidade de um Modelo de Regressão Linear Múltipla. Acesso em 14/10/2017.

RAMOS, Rômulo Leite. Sistema de acionamento de uma motobomba vibratória submersa alimentado por energia solar fotovoltaica. 2008. 141 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2008.

SANTOS, José Airton A. dos; MICHELS, Roger N.; GNOATTO, Estor. Desempenho de um sistema de bombeamento fotovoltaico na região oeste do Paraná. *Revista Agrogeoambiental, Inconfidentes, Mg*, v. 2, n. 2, p.22-25, set. 2010.

SETIAWAN, Ahmad Agus et al. Development of a Solar Water Pumping System in Karsts Rural Area Tepus, Gunungkidul through Student Community Services. *Energy Procedia*, [s.i.], v. 47, p.7-14, 2014. Elsevier BV.

SEGUEL, Julio Igor López. Projeto de um sistema fotovoltaico autônomo de suprimento de energia usando técnica MPPT e controle digital. **Master Degree Dissertation-Research Focus: Power Electronics, PPGEE-UFMG**, 2009.

SEVERINO, Mauro Moura. Avaliação técnico-econômica de um sistema híbrido de geração distribuída para o atendimento a comunidades isoladas da Amazônia. 2011.

SNIS, 2017. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento. **Série Histórica**. Disponível em <<http://app.cidades.gov.br/serieHistorica/>>. Acesso em 30 de maio de 2017.

SOARES, Guilherme Fleury Wanderley et al. Avaliação técnico-econômica da aplicação de sistemas fotovoltaicos individuais e

de centrais com minirredes na eletrificação rural. *Revista Brasileira de Energia Solar*, [s.i.], v. 2, n. 2, p.117-128, dez. 2011.

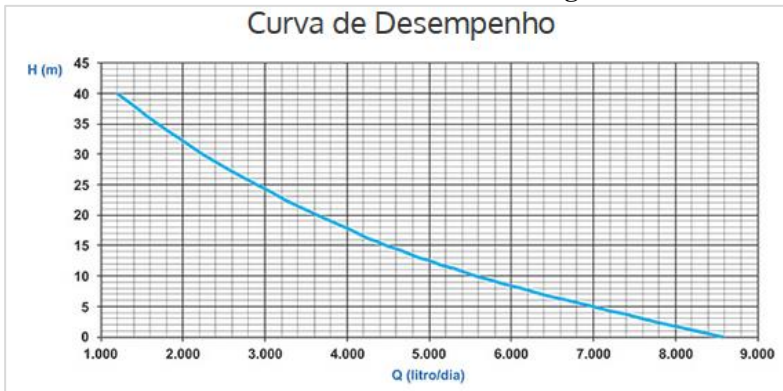
TSUTIYA, Milton Tomoyuki. Abastecimento de água. 4. ed. São Paulo: Daikoku, 2013. 643 p.

VASIL'CHENKO, G. V.. *Scale effects in modeling hydraulic structures. Hydrotechnical Construction*, [s.l.], v. 19, n. 7, p.374-378, jul. 1985. Springer Nature.

ZANIRATO, Leandro Diniz; MOURA, Leandro César de; CORDEIRO, Thiago Roberto Nunes. **Técnicas de Bombeamento de fluidos aplicando energia solar fotovoltaica**. 2011. 84 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Industrial Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2011.

ANEXO A – Caracterização técnica da bomba

Curva Característica da Bomba Anauger P100



Fonte: Anauger (2017).

Características Técnicas (Anauger, 2017)

Tipo: Bomba submersa vibratória

Resistência à umidade: IP58

Proteção Anticorrosiva

Isolação das bobinas: Classe H

Proteção contra choque elétrico: Classe I

Dimensões: 300 x 143 mm – saída 3/4’’

Vazão máxima: 8.600 L/d

Altura Manométrica máxima: 40 m (elevação)

Tensão entrada Driver: 36 Vdc

Submersão máxima: 10 m

Temperatura máxima d’água: 35°C

APÊNDICE A – Dados diários para o Sistema 1

Dia	Vazão Diária	Radiação diária	Radiação média	nº bombas	Vazão CCB
	L/d	Wh/m ²	W/m ²		L/d
01/09/2015	217	732	91	2	13616
02/09/2015	467	1344	149	2	15318
03/09/2015	1852	4213	421	2	17020
04/09/2015	333	1177	196	2	10212
05/09/2015	1254	3021	302	2	17020
06/09/2015	887	1593	159	2	17020
07/09/2015	2711	5422	542	2	17020
08/09/2015	2902	1974	197	2	17020
09/09/2015	3617	7275	727	2	17020
10/09/2015	2463	3890	432	2	15318
11/09/2015	721	955	119	2	13616
12/09/2015	4420	7314	731	2	17020
13/09/2015	4658	6866	687	2	17020
14/09/2015	4519	6954	695	2	17020
15/09/2015	4526	6757	676	2	17020
16/09/2015	923	2096	233	2	15318
21/09/2015	3412	3703	370	2	17020
23/09/2015	5111	5692	569	2	17020
24/09/2015	3568	4538	454	2	17020
25/09/2015	231	628	90	2	11914
28/09/2015	3464	5193	472	2	18722
29/09/2015	8498	6929	693	2	17020
30/09/2015	2195	2708	301	2	15318
27/10/2015	454	1164	145	2	13616
28/10/2015	3091	4825	483	2	17020
29/10/2015	5933	6576	598	2	18722
30/10/2015	6821	5542	554	2	17020

Dia	Vazão Diária	Radiação diária	Radiação média	nº bombas	Vazão CCB
31/10/2015	2243	2279	228	2	17020
01/11/2015	332	771	96	2	13616
02/11/2015	236	822	91	2	15318
03/11/2015	606	1421	203	2	11914
04/11/2015	255	718	103	2	11914
05/11/2015	489	1170	117	2	17020
06/11/2015	330	1184	118	2	17020
07/11/2015	1628	1819	202	2	15318
08/11/2015	1566	3117	283	2	18722
09/11/2015	5033	5180	432	2	20424
10/11/2015	3182	3614	402	2	15318
11/11/2015	1619	3067	279	2	18722
12/11/2015	3226	2957	329	2	15318
13/11/2015	551	1527	127	2	20424
14/11/2015	3740	4237	385	2	18722
15/11/2015	7652	6724	611	2	18722
16/11/2015	2993	3214	321	2	17020
17/11/2015	2364	3209	292	2	18722
18/11/2015	6187	5620	511	2	18722
19/11/2015	5099	6053	605	2	17020
20/11/2015	5173	5393	490	2	18722
21/11/2015	7441	6725	611	2	18722
22/11/2015	4785	4314	392	2	18722
23/11/2015	271	764	109	2	11914
24/11/2015	767	1903	173	2	18722
25/11/2015	1093	2048	205	2	17020
26/11/2015	1629	2500	227	2	18722
27/11/2015	2136	2639	293	2	15318
28/11/2015	816	1993	199	2	17020
29/11/2015	3712	4272	427	2	17020

Dia	Vazão Diária	Radiação diária	Radiação média	nº bombas	Vazão CCB
30/11/2015	2799	4026	403	2	17020
01/12/2015	3747	4446	404	2	18722
02/12/2015	142	598	75	2	13616
03/12/2015	2108	3665	333	2	18722
04/12/2015	1367	3004	250	2	20424
05/12/2015	3814	4386	439	2	17020
06/12/2015	591	1434	143	2	17020
07/12/2015	2761	2750	275	2	17020
08/12/2015	6797	6270	627	2	17020
10/12/2015	614	1026	128	2	13616
11/12/2015	5240	5369	488	2	18722
12/12/2015	3628	4281	389	2	18722
13/12/2015	4776	5524	502	2	18722
14/12/2015	1981	2780	232	2	20424
16/12/2015	2551	2745	274	2	17020
17/12/2015	6462	5721	477	2	20424
18/12/2015	2635	3920	392	2	17020
19/12/2015	430	1213	110	2	18722
20/12/2015	390	1217	101	2	20424
21/12/2015	1260	2359	214	2	18722
22/12/2015	4728	4914	410	2	20424
23/12/2015	2457	3243	324	2	17020
24/12/2015	865	1484	148	2	17020
25/12/2015	507	1376	153	2	15318
26/12/2015	1503	3258	296	2	18722
27/12/2015	1734	2597	260	2	17020
28/12/2015	2532	2789	398	2	11914
29/12/2015	1741	2487	226	2	18722
30/12/2015	3126	3685	409	2	15318
31/12/2015	4216	4698	427	2	18722

Dia	Vazão Diária	Radiação diária	Radiação média	nº bombas	Vazão CCB
01/01/2016	588	1301	163	2	13616
02/01/2016	592	1573	175	2	15318
03/01/2016	1298	2206	221	2	17020
04/01/2016	2061	3690	308	2	20424
05/01/2016	6115	5895	536	2	18722
06/01/2016	4109	4505	375	2	20424
07/01/2016	819	1976	198	2	17020
08/01/2016	578	1475	164	2	15318
09/01/2016	2220	2839	284	2	17020
10/01/2016	447	1216	122	2	17020
11/01/2016	3668	3887	353	2	18722
12/01/2016	4650	3762	314	2	20424
13/01/2016	5920	4696	391	3	30131
14/01/2016	1073	440	49	3	22598
16/01/2016	8137	6737	561	3	30131
17/01/2016	7369	6041	549	3	27620
18/01/2016	6893	4672	389	3	30131
19/01/2016	6654	6418	535	3	30131
20/01/2016	6332	5439	453	3	30131
21/01/2016	5836	4168	347	3	30131
22/01/2016	5936	3967	361	3	27620
03/02/2016	919	1624	162	3	25109
04/02/2016	2332	2742	249	3	27620
05/02/2016	2613	2713	339	3	20087
06/02/2016	1565	2702	246	3	27620
07/02/2016	811	1634	163	3	25109
08/02/2016	7775	6438	537	3	30131
09/02/2016	1739	2521	229	3	27620
10/02/2016	1989	2652	265	3	25109
11/02/2016	6914	5606	510	3	27620

Dia	Vazão Diária	Radiação diária	Radiação média	nº bombas	Vazão CCB
12/02/2016	7042	5775	525	3	27620
13/02/2016	6007	4891	408	3	30131
14/02/2016	1985	2139	214	3	25109
15/02/2016	2098	2513	228	3	27620
16/02/2016	1251	1868	208	3	22598
17/02/2016	7367	6298	573	3	27620
18/02/2016	3639	3591	359	3	25109
19/02/2016	6893	6263	569	3	27620
20/02/2016	3510	2780	278	3	25109
21/02/2016	3779	5437	544	3	25109
22/02/2016	6862	5567	619	3	22598
23/02/2016	3741	3845	384	3	25109
24/02/2016	4295	3660	407	3	22598
25/02/2016	5782	5200	473	3	27620
26/02/2016	7088	6001	546	3	27620
27/02/2016	4843	4563	507	3	22598
28/02/2016	915	1761	160	3	27620
29/02/2016	8744	6852	685	3	25109
01/03/2016	5289	6170	617	3	25109
02/03/2016	2462	2302	288	3	20087
03/03/2016	1318	1314	219	3	15066
04/03/2016	4174	3584	358	3	25109
05/03/2016	6940	5601	560	3	25109
06/03/2016	5584	4959	451	3	27620
07/03/2016	5689	4854	485	3	25109
08/03/2016	7093	5077	508	3	25109
09/03/2016	3963	3812	424	3	22598
10/03/2016	2971	3305	330	3	25109
11/03/2016	2321	3146	286	3	27620
12/03/2016	2798	2950	328	3	22598

Dia	Vazão Diária	Radiação diária	Radiação média	nº bombas	Vazão CCB
13/03/2016	5749	5006	556	3	22598
14/03/2016	4271	3264	326	3	25109
15/03/2016	4754	3733	373	3	25109
16/03/2016	6626	4612	512	3	22598
17/03/2016	8012	6730	673	3	25109
18/03/2016	8489	6755	676	3	25109
19/03/2016	1161	1450	181	3	20087
20/03/2016	957	1391	199	3	17576
21/03/2016	410	1181	131	3	22598
22/03/2016	4443	4217	469	3	22598
23/03/2016	6312	6643	664	3	25109
24/03/2016	6027	5189	519	3	25109
25/03/2016	11	108	108	3	2511
26/03/2016	7985	6149	615	3	25109
27/03/2016	8750	6798	680	3	25109
28/03/2016	6780	6091	609	3	25109
29/03/2016	6585	5433	543	3	25109
30/03/2016	5978	5000	556	3	22598
31/03/2016	2384	3081	342	3	22598
01/04/2016	4037	4666	467	3	25109
02/04/2016	7355	5810	581	3	25109
03/04/2016	6582	5989	665	3	22598
04/04/2016	488	1039	130	3	20087
05/04/2016	7012	5591	559	3	25109
06/04/2016	7401	5942	594	3	25109
07/04/2016	4872	5105	510	3	25109
08/04/2016	487	1036	148	3	17576
09/04/2016	4420	4274	534	3	20087
10/04/2016	1	325	65	3	12555
11/04/2016	1	546	109	3	12555

Dia	Vazão Diária	Radiação diária	Radiação média	nº bombas	Vazão CCB
12/04/2016	949	2054	205	3	25109
13/04/2016	1098	1908	212	3	22598
14/04/2016	4760	4219	469	3	22598
15/04/2016	6586	4800	600	3	20087
16/04/2016	7018	5522	614	3	22598
17/04/2016	7279	5717	635	3	22598

Fonte: Autoria própria (2017).

APÊNDICE B – Dados diários para o Sistema 2

Dia	Vazão Diária	Radiação diária	Radiação média	nº bombas	Vazão CCB
	L/d	Wh/m ²	W/m ²		L/d
15/05/2016	572	1225	153	2	10400
20/05/2016	163	428	143	2	3900
21/05/2016	580	1324	165	2	10400
22/05/2016	89	387	77	2	6500
26/05/2016	1911	2827	353	2	10400
27/05/2016	1500	1995	332	2	7800
29/05/2016	310	976	122	2	10400
31/05/2016	2584	2950	328	2	11700
03/06/2016	701	1478	164	2	11700
04/06/2016	178	661	83	2	10400
05/06/2016	159	645	107	2	7800
06/06/2016	80	420	70	2	7800
17/06/2016	12	151	50	2	3900
18/06/2016	1143	1844	231	2	10400
19/06/2016	844	1309	187	2	9100
22/06/2016	233	713	119	2	7800
23/06/2016	2619	3964	496	2	10400
30/06/2016	235	727	104	2	9100

Dia	Vazão Diária	Radiação diária	Radiação média	nº bombas	Vazão CCB
06/07/2016	2513	2905	484	3	11400
07/07/2016	5242	5742	638	3	17100
08/07/2016	4713	5024	628	3	15200
09/07/2016	76	622	104	3	11400
10/07/2016	3997	4063	451	3	17100
11/07/2016	1	167	56	3	5700
12/07/2016	4413	4769	477	3	19000
13/07/2016	25	444	89	3	9500
15/07/2016	3371	3995	666	3	11400
16/07/2016	1418	1985	284	3	13300
17/07/2016	5119	5631	626	3	17100
18/07/2016	2468	5118	640	2	10400
19/07/2016	1588	3531	589	2	7800
20/07/2016	3734	5356	595	2	11700
21/07/2016	3264	4574	572	2	10400
22/07/2016	3467	5184	576	2	11700
23/07/2016	2809	4611	576	2	10400
24/07/2016	2502	4048	450	2	11700
25/07/2016	2368	3787	473	2	10400
26/07/2016	1365	2598	325	2	10400
27/07/2016	3835	5913	657	2	11700
28/07/2016	84	1033	129	2	10400
29/07/2016	2498	3677	460	2	10400
30/07/2016	2414	4176	522	2	10400
31/07/2016	3273	4863	540	2	11700
01/08/2016	949	2399	300	2	10400
02/08/2016	1152	3253	361	2	11700
03/08/2016	47	695	99	2	9100
04/08/2016	2509	3963	495	2	10400
05/08/2016	2838	4619	513	2	11700

Dia	Vazão Diária	Radiação diária	Radiação média	nº bombas	Vazão CCB
06/08/2016	1567	3247	361	2	11700
07/08/2016	1121	2503	501	2	6500
08/08/2016	435	1330	166	2	10400
09/08/2016	2844	4725	525	2	11700
10/08/2016	3204	5312	590	2	11700
11/08/2016	2138	4515	502	2	11700
12/08/2016	2802	4221	469	2	11700
13/08/2016	2917	4765	529	2	11700
14/08/2016	2936	4811	535	2	11700
15/08/2016	558	1870	208	2	11700
16/08/2016	3081	5250	525	2	13000
17/08/2016	778	1771	197	2	11700
18/08/2016	2908	4941	549	2	11700
20/08/2016	5	585	84	2	9100
21/08/2016	43	703	100	2	9100
22/08/2016	2952	5683	631	2	11700
23/08/2016	3550	5470	608	2	11700
30/08/2016	466	1265	158	2	10400
22/09/2016	5999	6706	610	3	20900
23/09/2016	5282	6002	600	3	19000
24/09/2016	175	1321	147	3	17100
25/09/2016	4179	5776	578	3	19000
26/09/2016	5798	6881	626	3	20900
27/09/2016	5491	5990	545	3	20900
28/09/2016	5029	5941	594	3	19000
29/09/2016	2785	3065	383	3	15200
30/09/2016	701	1981	220	3	17100
01/10/2016	628	1855	186	3	19000
02/10/2016	3935	5565	506	3	20900
03/10/2016	641	1619	231	3	13300

Dia	Vazão Diária	Radiação diária	Radiação média	nº bombas	Vazão CCB
04/10/2016	428	1471	184	3	15200
05/10/2016	807	1735	217	3	15200
06/10/2016	188	1125	141	3	15200
21/10/2016	536	1050	105	3	19000
22/10/2016	4620	5242	524	3	19000
25/10/2016	740	1377	153	3	17100
26/10/2016	465	1158	116	3	19000
27/10/2016	7123	6035	549	3	20900
02/11/2016	3624	2697	270	3	19000
04/11/2016	6800	6439	585	3	20900
05/11/2016	7160	6307	573	3	20900
09/11/2016	1763	1796	180	3	19000
11/11/2016	1691	2403	218	3	20900
15/11/2016	4305	4956	451	3	20900
16/11/2016	1769	1858	206	3	17100
17/11/2016	1987	2382	238	3	19000
19/11/2016	4251	3844	384	3	19000
22/11/2016	1026	1594	159	3	19000
23/11/2016	2018	2811	256	3	20900
25/11/2016	3071	3385	308	3	20900
26/11/2016	5490	4501	375	3	22800
27/11/2016	4206	4175	417	3	19000

Fonte: Autoria própria (2017).

APÊNDICE C – Dados finais do modelo para aprendizagem

Data	Radiação Média	Relação de descarga real	Altura manométrica
	W/m ²	Adimensional	m
SISTEMA 1A			
02/09/2015	149,36	0,030	11,66
23/11/2015	109,20	0,023	11,66
07/01/2016	197,62	0,048	11,66
25/09/2015	89,75	0,019	11,66
20/12/2015	101,44	0,019	11,66
02/12/2015	74,81	0,010	11,66
13/11/2015	127,27	0,027	11,66
19/12/2015	110,31	0,023	11,66
24/11/2015	172,98	0,041	11,66
01/09/2015	91,50	0,016	11,66
08/01/2016	163,88	0,038	11,66
08/09/2015	197,38	0,171	11,66
06/09/2015	159,30	0,052	11,66
02/01/2016	174,78	0,039	11,66
02/11/2015	91,39	0,015	11,66
25/12/2015	152,84	0,033	11,66
10/12/2015	128,29	0,045	11,66
21/12/2015	214,47	0,067	11,66
07/12/2015	274,99	0,162	11,66
31/10/2015	227,95	0,132	11,66
16/12/2015	274,49	0,150	11,66
16/09/2015	232,85	0,060	11,66
04/12/2015	250,35	0,067	11,66
03/11/2015	203,01	0,051	11,66
26/11/2015	227,28	0,087	11,66
07/11/2015	202,06	0,106	11,66
17/11/2015	291,70	0,126	11,66

Data	Radiação Média	Relação de descarga real	Altura manométrica
09/01/2016	283,88	0,130	11,66
03/01/2016	220,55	0,076	11,66
30/09/2015	300,85	0,143	11,66
22/11/2015	392,20	0,256	11,66
21/09/2015	370,25	0,200	11,66
12/01/2016	313,53	0,228	11,66
14/11/2015	385,16	0,200	11,66
04/01/2016	307,51	0,101	11,66
05/09/2015	302,07	0,074	11,66
03/12/2015	333,16	0,113	11,66
12/12/2015	389,14	0,194	11,66
23/12/2015	324,34	0,144	11,66
22/12/2015	409,53	0,231	11,66
30/12/2015	409,41	0,204	11,66
01/12/2015	404,21	0,200	11,66
31/12/2015	427,09	0,225	11,66
05/12/2015	438,57	0,224	11,66
10/09/2015	432,19	0,161	11,66
29/11/2015	427,15	0,218	11,66
09/11/2015	431,68	0,246	11,66
17/12/2015	476,74	0,316	11,66
24/09/2015	453,80	0,210	11,66
13/12/2015	502,14	0,255	11,66
07/09/2015	542,20	0,159	11,66
30/10/2015	554,21	0,401	11,66
05/01/2016	535,92	0,327	11,66
09/09/2015	727,48	0,212	11,66
15/11/2015	611,30	0,409	11,66
29/09/2015	692,90	0,499	11,66
14/09/2015	695,42	0,265	11,66

Data	Radiação Média	Relação de descarga real	Altura manométrica
19/11/2015	605,35	0,300	11,66
21/11/2015	611,38	0,397	11,66
SISTEMA 1B			
08/04/2016	147,99	0,028	12,10
03/02/2016	162,36	0,037	12,10
19/03/2016	181,23	0,058	12,10
20/03/2016	198,72	0,054	12,10
21/03/2016	131,19	0,018	12,10
09/02/2016	229,22	0,063	12,10
06/02/2016	245,68	0,057	12,10
20/02/2016	278,00	0,140	12,10
14/02/2016	213,92	0,079	12,10
10/02/2016	265,16	0,079	12,10
12/04/2016	205,36	0,038	12,10
16/02/2016	207,54	0,055	12,10
13/04/2016	212,02	0,049	12,10
31/03/2016	342,31	0,105	12,10
18/02/2016	359,09	0,145	12,10
18/01/2016	389,31	0,229	12,10
14/03/2016	326,35	0,170	12,10
15/03/2016	373,34	0,189	12,10
05/02/2016	339,15	0,130	12,10
04/03/2016	358,41	0,166	12,10
21/01/2016	347,34	0,194	12,10
20/01/2016	453,27	0,210	12,10
09/03/2016	423,50	0,175	12,10
07/03/2016	485,40	0,227	12,10
25/02/2016	472,74	0,209	12,10
13/02/2016	407,55	0,199	12,10
24/02/2016	406,70	0,190	12,10

Data	Radiação Média	Relação de descarga real	Altura manométrica
06/04/2016	594,22	0,295	12,10
05/04/2016	559,13	0,279	12,10
17/02/2016	572,53	0,267	12,10
05/03/2016	560,15	0,276	12,10
24/03/2016	518,92	0,240	12,10
19/01/2016	534,84	0,221	12,10
02/04/2016	580,99	0,293	12,10
16/01/2016	561,44	0,270	12,10
30/03/2016	555,54	0,265	12,10
27/02/2016	506,99	0,214	12,10
08/03/2016	507,65	0,282	12,10
09/04/2016	534,28	0,220	12,10
13/03/2016	556,27	0,254	12,10
26/02/2016	545,54	0,257	12,10
17/01/2016	549,20	0,267	12,10
26/03/2016	614,85	0,318	12,10
03/04/2016	665,45	0,291	12,10
18/03/2016	675,52	0,338	12,10
17/03/2016	672,99	0,319	12,10
16/04/2016	613,55	0,311	12,10
23/03/2016	664,32	0,251	12,10
01/03/2016	617,05	0,211	12,10
SISTEMA 2A			
03/06/2016	164,27	0,060	19,06
15/05/2016	153,12	0,055	19,06
17/06/2016	50,34	0,003	19,06
21/05/2016	165,49	0,056	19,06
19/06/2016	187,05	0,093	19,06
06/06/2016	70,02	0,010	19,06
22/05/2016	77,34	0,014	19,06

Data	Radiação Média	Relação de descarga real	Altura manométrica
17/08/2016	196,77	0,066	19,06
30/08/2016	158,10	0,045	19,06
30/06/2016	103,83	0,026	19,06
28/07/2016	129,07	0,008	19,06
03/08/2016	99,22	0,005	19,06
18/06/2016	230,51	0,110	19,06
01/08/2016	299,86	0,091	19,06
27/05/2016	332,49	0,192	19,06
26/05/2016	353,32	0,184	19,06
26/07/2016	324,69	0,131	19,06
02/08/2016	361,48	0,098	19,06
29/07/2016	459,60	0,240	19,06
12/08/2016	469,00	0,240	19,06
25/07/2016	473,41	0,228	19,06
23/06/2016	495,51	0,252	19,06
05/08/2016	513,19	0,243	19,06
30/07/2016	522,05	0,232	19,06
16/08/2016	524,99	0,237	19,06
09/08/2016	525,01	0,243	19,06
14/08/2016	534,57	0,251	19,06
21/07/2016	571,80	0,314	19,06
19/07/2016	588,52	0,204	19,06
10/08/2016	590,24	0,274	19,06
20/07/2016	595,11	0,319	19,06
18/07/2016	639,69	0,237	19,06
27/07/2016	656,97	0,328	19,06
SISTEMA 2B			
09/07/2016	103,62	0,007	19,85
21/10/2016	105,03	0,028	19,85
26/10/2016	115,83	0,024	19,85

Data	Radiação Média	Relação de descarga real	Altura manométrica
25/10/2016	152,97	0,043	19,85
22/11/2016	159,44	0,054	19,85
09/11/2016	179,56	0,093	19,85
04/10/2016	183,88	0,028	19,85
01/10/2016	185,50	0,033	19,85
16/11/2016	206,45	0,103	19,85
05/10/2016	216,85	0,053	19,85
11/11/2016	218,42	0,081	19,85
16/07/2016	283,50	0,107	19,85
23/11/2016	255,58	0,097	19,85
26/11/2016	375,06	0,241	19,85
29/09/2016	383,15	0,183	19,85
27/11/2016	417,49	0,221	19,85
15/11/2016	450,52	0,206	19,85
12/07/2016	476,92	0,232	19,85
02/10/2016	505,91	0,188	19,85
27/09/2016	544,51	0,263	19,85
27/10/2016	548,60	0,341	19,85
05/11/2016	573,33	0,343	19,85
04/11/2016	585,34	0,325	19,85
23/09/2016	600,20	0,278	19,85
26/09/2016	625,56	0,277	19,85
08/07/2016	628,04	0,310	19,85
15/07/2016	665,81	0,296	19,85

Fonte: Autoria própria (2017).

APÊNDICE D – Dados finais do modelo para teste

Data	Radiação Média	Relação de descarga real	Altura manométrica
	W/m ²	adimensional	m

Data	Radiação Média	Relação de descarga real	Altura manométrica
SISTEMA 1A			
06/11/2015	118,39	0,019	11,66
10/01/2016	121,62	0,026	11,66
05/11/2015	117,00	0,029	11,66
06/12/2015	143,41	0,035	11,66
27/10/2015	145,48	0,033	11,66
04/09/2015	196,23	0,033	11,66
01/11/2015	96,35	0,024	11,66
04/11/2015	102,53	0,021	11,66
01/01/2016	162,61	0,043	11,66
24/12/2015	148,43	0,051	11,66
28/11/2015	199,31	0,048	11,66
11/09/2015	119,43	0,053	11,66
14/12/2015	231,63	0,097	11,66
27/12/2015	259,71	0,102	11,66
27/11/2015	293,18	0,139	11,66
25/11/2015	204,75	0,064	11,66
26/12/2015	296,18	0,080	11,66
11/11/2015	278,83	0,086	11,66
08/11/2015	283,38	0,084	11,66
29/12/2015	226,07	0,093	11,66
18/12/2015	392,01	0,155	11,66
28/12/2015	398,43	0,213	11,66
12/11/2015	328,59	0,211	11,66
06/01/2016	375,41	0,201	11,66
16/11/2015	321,44	0,176	11,66
11/01/2016	353,40	0,196	11,66
28/10/2015	482,50	0,182	11,66
03/09/2015	421,30	0,109	11,66

Data	Radiação Média	Relação de descarga real	Altura manométrica
10/11/2015	401,52	0,208	11,66
11/12/2015	488,09	0,280	11,66
20/11/2015	490,23	0,276	11,66
30/11/2015	402,63	0,164	11,66
28/09/2015	472,06	0,185	11,66
23/09/2015	569,15	0,300	11,66
29/10/2015	597,86	0,317	11,66
18/11/2015	510,93	0,330	11,66
13/09/2015	686,62	0,274	11,66
08/12/2015	627,02	0,399	11,66
15/09/2015	675,72	0,266	11,66
12/09/2015	731,36	0,260	11,66
SISTEMA 1B			
28/02/2016	160,06	0,033	12,10
04/04/2016	129,84	0,024	12,10
14/01/2016	48,92	0,047	12,10
07/02/2016	163,42	0,032	12,10
15/02/2016	228,49	0,076	12,10
04/02/2016	249,24	0,084	12,10
03/03/2016	218,93	0,087	12,10
02/03/2016	287,75	0,123	12,10
11/03/2016	286,03	0,084	12,10
22/01/2016	360,68	0,215	12,10
10/03/2016	330,48	0,118	12,10
23/02/2016	384,49	0,149	12,10
12/03/2016	327,83	0,124	12,10
13/01/2016	391,35	0,196	12,10
01/04/2016	466,63	0,161	12,10
06/03/2016	450,85	0,202	12,10
22/03/2016	468,55	0,197	12,10

Data	Radiação Média	Relação de descarga real	Altura manométrica
14/04/2016	468,74	0,211	12,10
08/02/2016	536,52	0,258	12,10
15/04/2016	599,94	0,328	12,10
11/02/2016	509,67	0,250	12,10
21/02/2016	543,73	0,151	12,10
07/04/2016	510,47	0,194	12,10
29/03/2016	543,29	0,262	12,10
16/03/2016	512,40	0,293	12,10
12/02/2016	525,03	0,255	12,10
19/02/2016	569,33	0,250	12,10
29/02/2016	685,23	0,348	12,10
28/03/2016	609,07	0,270	12,10
22/02/2016	618,58	0,304	12,10
27/03/2016	679,79	0,348	12,10
17/04/2016	635,26	0,322	12,10
SISTEMA 2A			
08/08/2016	166,29	0,042	19,06
22/06/2016	118,81	0,030	19,06
04/06/2016	82,57	0,017	19,06
29/05/2016	122,04	0,030	19,06
21/08/2016	100,41	0,005	19,06
20/05/2016	142,63	0,042	19,06
20/08/2016	83,51	0,001	19,06
05/06/2016	107,45	0,020	19,06
15/08/2016	207,77	0,048	19,06
06/08/2016	360,77	0,134	19,06
31/05/2016	327,80	0,221	19,06
24/07/2016	449,83	0,214	19,06
04/08/2016	495,39	0,241	19,06
07/08/2016	500,56	0,172	19,06

Data	Radiação Média	Relação de descarga real	Altura manométrica
11/08/2016	501,69	0,183	19,06
13/08/2016	529,50	0,249	19,06
31/07/2016	540,29	0,280	19,06
18/08/2016	548,98	0,249	19,06
22/07/2016	576,02	0,296	19,06
23/07/2016	576,32	0,270	19,06
23/08/2016	607,76	0,303	19,06
22/08/2016	631,49	0,252	19,06
SISTEMA 2B			
13/07/2016	88,72	0,003	19,85
11/07/2016	55,66	0,000	19,85
06/10/2016	140,64	0,012	19,85
24/09/2016	146,77	0,010	19,85
30/09/2016	220,09	0,041	19,85
03/10/2016	231,26	0,048	19,85
17/11/2016	238,23	0,105	19,85
02/11/2016	269,73	0,191	19,85
25/11/2016	307,76	0,147	19,85
19/11/2016	384,43	0,224	19,85
10/07/2016	451,41	0,234	19,85
06/07/2016	484,17	0,220	19,85
22/10/2016	524,18	0,243	19,85
25/09/2016	577,56	0,220	19,85
28/09/2016	594,09	0,265	19,85
22/09/2016	609,63	0,287	19,85
17/07/2016	625,70	0,299	19,85
07/07/2016	637,97	0,307	19,85

Fonte: Autoria própria (2017).