



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENERGIA NUCLEAR
COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR
CENTRO REGIONAL DE CIÊNCIAS NUCLEARES DO NORDESTE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM TECNOLOGIAS ENERGÉTICAS E
NUCLEARES

FÁBIO ALVES DE BRAZ COUTINHO

**MODELAGEM COM RNA DE UM SISTEMA DE SUPRIMENTO DE ÁGUA FV
PARA DIFERENTES CONDIÇÕES CLIMÁTICAS**

Recife

2019

Catálogo na fonte
Bibliotecário Carlos Moura, CRB-4 / 1502

C871m Coutinho, Fábio Alves de Braz.
Modelagem com RNA de um sistema de suprimento de água FV para diferentes condições climáticas. / Fábio Alves de Braz Coutinho. - Recife, 2019.
105 f. : il.

Orientador: Prof. Dr. Chigueru Tiba.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares, 2019.
Inclui referências e apêndice.

1. Engenharia de energia solar. 2. Bombeamento de água fotovoltaico. 3. Modelagem e dimensionamento. 4. Sistema de suprimento de água fotovoltaico. 5. Rede Neural Artificial. I. Tiba, Chigueru, orientador. II. Título.

621.47 CDD (22. ed.)

UFPE/BDEN-2019/19

FÁBIO ALVES DE BRAZ COUTINHO

**MODELAGEM COM RNA DE UM SISTEMA DE SUPRIMENTO DE ÁGUA FV
PARA DIFERENTES CONDIÇÕES CLIMÁTICAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção o título de mestre em fontes renováveis de energia

Área de concentração: Fontes Renováveis de Energia.

Orientador: Prof. Dr. Chigueru Tiba

Recife

2019

FÁBIO ALVES DE BRAZ COUTINHO

**MODELAGEM COM RNA DE UM SISTEMA DE SUPRIMENTO DE ÁGUA FV
PARA DIFERENTES CONDIÇÕES CLIMÁTICAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de mestre em fontes renováveis de energia

Aprovado em: 27/06/2019

BANCA EXAMINADORA

Prof^o. Dr. Chigueru Tiba (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof^o. Dr. Carlos Alberto Brayner de Oliveira Lira (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof^o. Dr. Alcides Codeceira Neto (Examinador Interno)
Universidade de Pernambuco

Prof^o. Dr. Sérgio da Silva Leal (Examinador Externo)
Instituto Federal de Pernambuco

Dedicado a todos que de alguma forma sacrificaram

algo por esse trabalho

AGRADECIMENTOS

A Deus em primeiro lugar, pelo dom da vida, pois apenas isso já é suficiente para perseguir os sonhos, mas, o agradecimento vai além disso, obrigado Senhor por todas as oportunidades e por sempre me ajudar.

Ao meu orientador prof. Dr. Chigueru Tiba pelos ensinamentos, pela paciência e por todos os conselhos que me foi dado, inclusive os não relacionados diretamente ao estudo, que tentarei sempre levar comigo. Aos professores que lecionaram as disciplinas que estudei, incluindo os professores que participaram das bancas de seminário. A Rinaldo de Oliveira Melo pelo apoio técnico na confecção e execução do experimento. À Nilvânia Monteiro e a equipe da secretaria do PROTEN, pela ajuda com a burocracia e papeladas do PROTEN. E à banca examinadora, pela disponibilidade de examinar e ajudar a melhorar esse trabalho.

À minha família que sempre estiveram comigo e me ensinaram valores de uma vida honrada, especialmente meus pais, Braz e Elisangela, por todo sacrifício que fizeram por mim ao longo de toda a minha vida. Aos meus irmãos Laura e Pedro por me ajudarem mesmo que nem eu nem eles sabemos exatamente qual é ou como acontece essa ajuda. À Maria Eduarda, minha namorada, a quem espero que um dia possa tornar-se minha esposa, que sempre ajuda a me manter estável no eixo.

E finalmente a todos que fizeram algum sacrifício direto ou indireto, por menor que seja, para a construção desse trabalho, em especial à Maria Cristina de Araújo pela revisão ortográfica e a Wender Santana pela ajuda em programação e no inglês, eu deixo os meus sinceros agradecimentos.

RESUMO

Neste estudo foi analisado e modelado o comportamento de um sistema de suprimento de água com tecnologia FV em diferentes condições climáticas. O sistema de suprimento de água com tecnologia FV (Photovoltaic Water Supply System - PVWSS) é constituído de um conjunto gerador FV, um inversor de frequência, uma motobomba e um sistema de armazenamento. Este sistema de suprimento de água foi exaustivamente testado experimentalmente, em uma bancada de testes em condição reais de operação (outdoor). Os parâmetros meteorológicos e geométricos do sistema e seus resultados de vazões foram utilizados para a realização de uma modelagem via RNA para estimar o volume bombeado em função das condições meteorológicas e das alturas de recalque. A modelagem RNA previu a vazão com desvio percentual e erro médio quadrático normalizado de -0,6% e 6,85% respectivamente. Utilizando uma curva de demanda residencial de água o funcionamento do sistema foi simulado para 03 localidades distintas e com diferentes condições climáticas. Para uma dada altura de recalque, uma demanda específica (quantidade e perfil horário), cada localidade apresentou uma relação única entre o custo de bombeamento e o deficit. No caso desse sistema específico a relação ótima é de aproximadamente 0,2% de déficit para R\$ 1,20 por m³ bombeado para uma altura de recalque de 24 metros. A ideia básica estabelecida nessa dissertação foi a proposição de um procedimento de projeto inovador para facilitar a comercialização em massa de alguns tipos de sistemas de bombeamento (kits) em qualquer localidade onde existam informações meteorológicas básicas. Obviamente cada kit de bombeamento mencionado anteriormente deverá ser previamente testado em uma bancada experimental como sugerido nesse trabalho.

Palavras-chave: Energia solar. Bombeamento de água FV. Modelagem e dimensionamento. Sistema de Suprimento de água FV. RNA

ABSTRACT

This study intends to model and analyze a PhotoVoltaic Water Supply System (PVWPS) in different climatic conditions. The PVWPS consists in a set of photovoltaic panels, a frequency inverter, a pump and a storage system. This system has been overly tested experimentally in a test bench in real conditions (outdoor). The meteorological and geometrical parameters of system and their due flow rate has been developed using an Artificial Neural Network (ANN) modeling a function of meteorological data and height of the storage vessel. The model using an ANN has predicted the flow rate with percentile deviation of -0.6% and mean bias error of 6.85%. Using a residential water demand curve, the system was simulated for 3 different locations with different climatic conditions. For each height is given a specific demand of water (amount and time profile), each location has presented a unique relation between the cost of the pumping and the deficit. In a specific case the best relation is approximately 0.2% of deficit to R\$ 1.20 per m³ pumped to a height of 24 meters. The basic idea has been established in this dissertation was the proposition of an innovative design procedure of basic pump-photovoltaic systems (kit) to any location where there is basic meteorological data. Obviously, each previously mentioned pumping kit should be previously tested on an experimental bench as suggested in this dissertation.

Keywords: Solar energy. PV water pumping. Modeling and design. PV Water Supply System. ANN

LISTA DE FIGURAS

Figura 1–	Reservas de água subterrâneos e sua qualificação na Região Nordeste.....	18
Figura 2–	Recurso solar anual no Nordeste Brasileiro.....	19
Figura 3 –	Sistema de abastecimento de água FV para fins de consumo doméstico.....	27
Figura 4 –	Sistema de abastecimento de água FV para fins de irrigação	28
Figura 5 –	Configuração predominante do SBFV.....	29
Figura 6 –	Exemplo de Curva Característica de um SBFV.....	30
Figura 7 –	Camadas de construção de um Módulo FV.....	31
Figura 8 –	Curvas Características tensão vs corrente de um módulo FV	32
Figura 9 –	Influência da radiação incidente na curva característica de um módulo FV	33
Figura 10 –	Influência da temperatura de funcionamento na curva característica de um módulo FV	34
Figura 11 –	Formas de ligações possíveis entre o gerador e a carga.....	36
Figura 12 –	Diagrama do uso aconselhável dos tipos de diferentes bombas para as diversas condições de vazão e pressão....	40
Figura 13 –	Representação Simplificada do neurônio artificial.....	41
Figura 14 –	Esquema da arquitetura de uma rede neural com 2 níveis ocultos	42
Figura 15 –	Localizações geográficas das estações SONDA	44
Figura 16 –	Equipamento de rastreamento do sol- SOLYS-2	46
Figura 17 –	Piranômetro de precisão da estação FAE	47
Figura 18 –	Pireliômetro da estação FAE	47
Figura 19 –	Piranômetro inclinado 23° da estação FAE	48
Figura 20 –	Perfil de Consumo diário	53
Figura 21 –	Layout esquemático da Bancada de testes para SBFV.....	54
Figura 22 –	Fotografia da Bancada de Testes de SBFV.....	55
Figura 23 –	Fotografia do arranjo FV utilizado no experimento	56
Figura 24 –	Curva Característica do Arranjo	57

	Sistema de controle de um conversor de frequência configurado para operar com tensão de alimentação constante	58
Figura 25 –		
Figura 26 –	Sistema de aquisição de dados	59
Figura 27 –	Divisor de Tensão	60
Figura 28 –	Piranômetro instalado no SBFV	61
Figura 29 –	Sensor de umidade relativa e temperatura ambiente.....	62
Figura 30 –	Sensor de direção e velocidade do vento.....	63
Figura 31 –	Medidas térmicas do arranjo.....	64
Figura 32 –	Medidor de vazão eletromagnético	64
Figura 33 –	Diagrama Hidráulico da Bancada de testes de SBFV	66
Figura 34 –	Diagrama Geral do SBFV.....	67
Figura 35 –	Diferentes distribuições de irradiação	70
Figura 36 –	Fluxograma Geral do Processo de Previsão do volume em um local qualquer	72
Figura 37 –	Fluxograma da Rede Neural Artificial – Principal.....	73
Figura 38 –	Fluxograma da Rede 23G	75
Figura 39 –	Fluxograma da Rede da Temperatura.....	77
Figura 40 –	Modelagem Irradiação vs vazão	78
Figura 41 –	Curva Característica 12 metros vs experimental	79
Figura 42 –	Curva Característica 24 metros vs experimental.....	80
Figura 43 –	Curva Característica 32 metros vs experimental	80
Figura 44 –	Curva Característica 42 metros vs experimental.....	81
Figura 45 –	RNA vs Polinomial 12 metros	83
Figura 46 –	Curva Característica- RNA vs Polinomial 24 metros.....	84
Figura 47 –	Curva Característica- RNA vs Polinomial 32 metros.....	84
Figura 48 –	Curva Característica- RNA vs Polinomial 42 metros.....	85
Figura 49 –	Cálculo da Irradiação- Experimental vs RNA	86
Figura 50 –	Comparação do cálculo da temperatura: RNA Vs Skoplasqui	87
Figura 51 –	Figura 51- Comportamento do SBFV em Petrolina, altura manométrica 24 m	89
Figura 52 –	Comparação do Recurso Solar no mês de abril	90

Figura 53 –	Comparação do Recurso Solar no mês de Novembro	90
Figura 54 –	Comportamento do SBFV em Patos, altura manométrica 24 m	91
Figura 55 –	Curva da probabilidade de perda de abastecimento e custo da água bombeada	95

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –	Variáveis medidas nas estações SONDA	44
Tabela 2 –	Demanda do consumo relativo de água diário residencial	52
Tabela 3 –	Características nominais do módulo FV utilizado	55
Tabela 4 –	Características nominais do Arranjo	56
Tabela 5 –	Características do conjunto motor bomba	58
Tabela 6 –	Resultado da Modelagem polinomial.....	81
Tabela 7 –	Eficiência do SBFV	82
Tabela 8 –	Resultado da Modelagem em RNA do SBFV	82
Tabela 9 –	Resultado da Modelagem por Altura	83
Tabela 10 –	Rede 23G vs Correlação de Olmo et al.	86
Tabela 11 –	Rede da Temperatura vs Correlação de E. Skoplaqui et al.	87
Tabela 12 –	Resumo da estimativa anual em Patos- PB	92
Tabela 13 –	Resumo da estimativa anual em Recife-PE.....	92
Tabela 14 –	Custo para o sistema com poço de 17 metros	94

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AC	Alternate Current – Corrente alternada
ACS	Medidor de corrente
BSRN	Baseline Surface Radiation Network
CE	Condutibilidade Elétrica
CNAB	Custo Nivelado de Água Bombeada.
CPUC	California Public Utilities Commission
DC	Direct Current- Corrente Contínua
DP	Desvio Percentual
EMQN	Erro Médio Quadrático Normalizado
FAE	Fontes Alternativas de Energia
FF	Fator de forma
FV	Fotovoltaico
HSA	Horário Solar Aparente
Icol	Irradiância Coletada
I _{mp}	Corrente de máxima potência
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
I _{sc}	Current short circuit- corrente de curto circuito
MP	Medidor de Pressão
MV	Medidor de Vazão
NCT	Nível de Carregamento do Tanque
PAR	Radiação Fotossinteticamente Ativa
PID	Proporcional Integral Derivativo
PMP	Ponto de Máxima Potência
PPA	Probabilidade de Perda de Abastecimento
ppm	Partes por milhão
PSP	Precision Spectral Pyranometer
PVWSS	Photovoltaic Water Supply Sistem

RNA	Rede Neural Artificial
RMSE	Root Mean Square Error
SBFV	Sistema de bombeamento Fotovoltaico
SONDA	Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais
SSAFV	Sistema de suprimento de água fotovoltaico
UFPE	Universidade Federal de Pernambuco
USD	United State Dólar- Dólar Americano
Vex	Volume de excesso de água
Vmp	Tensão de máxima potência
Voc	Voltage open circuit - tensão de circuito aberto
WRMC	World Radiation Monitoring Center

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	OBJETIVOS	20
1.1.1	Objetivo Principal	20
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
3	FUNDAMENTOS TEÓRICOS	27
3.1	SISTEMA DE BOMBEAMENTO FOTOVOLTAICO	27
3.2	GERADOR FOTOVOLTAICO	30
3.3	SISTEMA DE ACOPLAMENTO GERADOR-CARGA.....	35
3.3.1	Seguidor de Máxima Potência	36
3.3.2	Ponto de Trabalho Fixo	36
3.4	MOTORES ELÉTRICOS	37
3.4.1	Motores de Corrente Alternada	37
3.4.2	Motores de Corrente Contínua	38
3.5	BOMBAS HIDRÁULICAS	39
3.5.1	Bombas Dinâmicas	39
3.5.2	Bombas Volumétricas	39
3.6	REDES NEURAIS ARTIFICIAIS	40
3.6.1	Neurônio Artificial	41
3.6.2	Princípio de Funcionamento da RNA	42
3.7	BANCO DE DADOS DE IRRADIAÇÃO E OUTROS PARÂMETROS METEOROLÓGICOS	43
3.7.1	Banco de Dados Solarimétricos – Rede SONDA	43
3.7.2	Banco de Dados do Grupo FAE	45

3.7.3	Banco de Dados Patos – PB	48
3.8	CÁLCULO DE RADIAÇÃO NO PLANO INCLINADO	48
3.9	MODELAGEM DO SISTEMA DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA FV .	49
3.10	PERFIL DE DEMANDA DE ÁGUA RESIDENCIAL	51
4	METODOLOGIA	54
4.1	DESCRIÇÃO GERAL DA BANCADA DE TESTE	54
4.2	ARRANJO FOTOVOLTAICO	55
4.3	INVERSOR DE FREQUÊNCIA	57
4.4	CONJUNTO MOTOR BOMBA	58
4.5	SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS	59
4.5.1	Parâmetros Monitorados	59
4.6	INDICADORES ESTATÍSTICOS	68
4.7	ANÁLISE ECONÔMICA	68
4.8	CAMPANHA DE MEDIÇÃO	69
4.9	MODELAGEM POLINOMIAL	69
4.10	MODELAGEM EM RNA DO SBFV	71
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	78
5.1	DETERMINAÇÃO ESPERIMENTAL DA CURVA CARACTERÍSTICA DO SBFV	78
5.2	MODELAGEM RNA DO SBFV.....	82
5.3	MODELAGEM DO SBFV PARA CONDIÇÕES CLIMÁTICAS DIVERSAS	85
5.4	MODELAGEM DA TEMPERATURA DO ARRANJO FV	87
5.5	INFERÊNCIA DO DESEMPENHO DO SBFV PARA CONDIÇÕES CLIMÁTICAS DIVERSAS	88

5.6	ESTIMATIVA DO COMPORTAMENTO DO SBFV EM PETROLINA .	88
5.7	ESTIMATIVA DO COMPORTAMENTO DO SBFV EM PATOS	91
5.8	DIMENSIONAMENTO DO RESERVATÓRIO	93
6	CONCLUSÕES	96
7	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	98
	REFERÊNCIAS	99
	APÊNDICE A- LISTA DE EQUAÇÕES	105

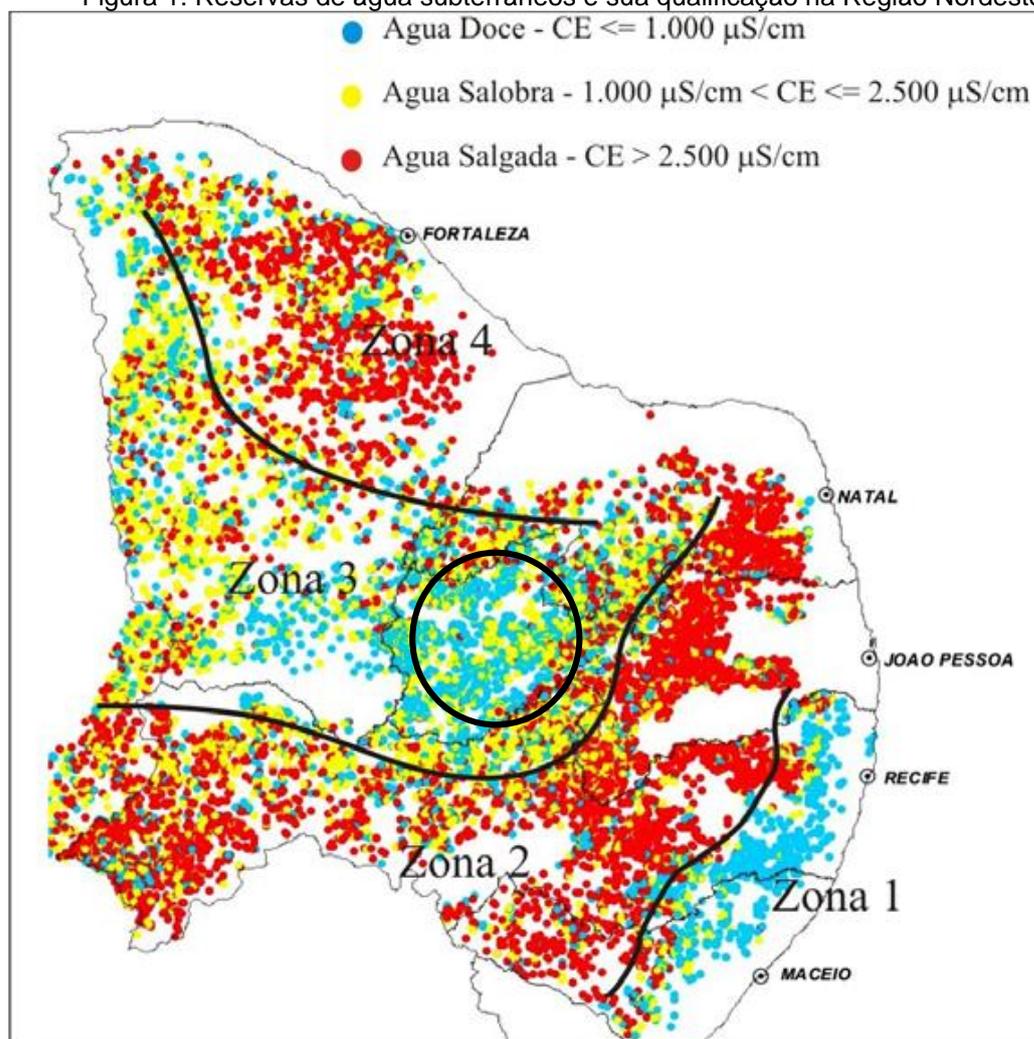
1 INTRODUÇÃO

Energia e água são dois insumos necessários para a sustentação da vida humana no planeta Terra. Na cadeia produtiva da água, principalmente no transporte e tratamento, uma quantidade significativa de energia é exigida. Em uma cidade como Recife, por exemplo, a companhia de abastecimento de água tem a metade do custo de produção da sua água devido à necessidade de bombeamentos diversos.

No Brasil, de acordo com o último censo há mais de 88 mil residências sem energia elétrica, a maior parte na área rural. No Nordeste 7,4% das residências rurais não têm eletricidade. O pior cenário é na região norte onde 24,1% dos domicílios rurais não têm energia elétrica. (1)

Na região Nordeste do Brasil existe a seguinte dicotomia: o sol é abundante e água é escassa. Existe pouca água superficial, mal distribuída espacialmente, de baixa qualidade e disponível somente em alguns períodos do ano (04 meses por ano). A água subterrânea também é escassa devido a uma formação geológica predominantemente cristalina. E muitas vezes apresenta-se salobra. Mas, existem bolsões de água subterrânea com qualidade que pode ser uma alternativa para suprimento doméstico e animal desde que exista energia para efetuar o seu bombeamento. A figura 1 ilustra esses bolsões espalhados (por exemplo, a região delimitada pela circunferência) pela região Nordeste, onde a condutibilidade elétrica (CE), medida em Siemens por centímetro, é um indicativo da qualidade da água quanto ao grau de salinização. A água é considerada potável quando $CE \leq 1000 \mu\text{S}/\text{cm}$.

Figura 1: Reservas de água subterrâneas e sua qualificação na Região Nordeste

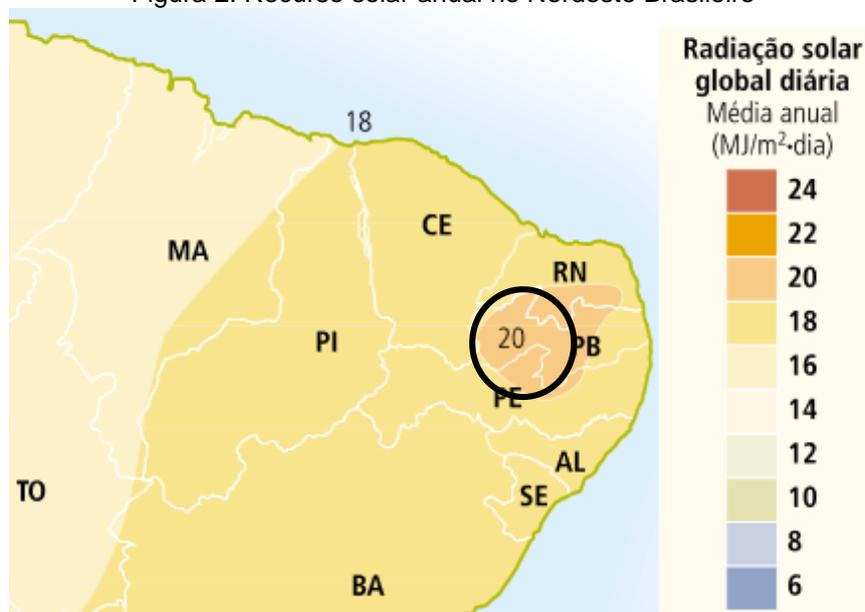


Fonte: Feitosa e Diniz, 2009 (2)

Então, para tais locais que também possuem incidência da irradiação solar como o sertão do semiárido do Nordeste do Brasil, como mostrado na figura 2, a utilização de sistemas de bombeamento acionados por energia solar fotovoltaica (SBFV) é uma opção a considerar. Na figura 2 percebe-se que todo o semiárido da região NE possui pelo menos uma densidade anual de energia solar disponível de 18 MJ/m², e particularmente no semiárido Paraibano, que corresponde à parte leste da zona 3 (parte destacada pelo círculo), uma densidade de 20 MJ/m² o que é uma condição climática ótima para aplicação de SBFV. A água bombeada poderá ser usada para irrigação, consumo animal, humano ou outras aplicações quaisquer. A vantagem da utilização dessa tecnologia é que a geração de eletricidade poderá ser facilmente e economicamente armazenada hidráulicamente em um reservatório elevado de tamanho ótimo. Além disso, conforme Dadhich e Shrivastava (3) o SBFV

é um investimento mais rentável do que seu principal concorrente nessa aplicação, ou seja, o bombeamento de água utilizando o motor diesel.

Figura 2: Recurso solar anual no Nordeste Brasileiro



Fonte: Atlas de Energia solar, ANEEL, 2003 (4)

A tecnologia de bombeamento FV é disponível comercialmente, já provou sua confiabilidade, tem baixas exigências de treinamento para operadores e os custos de operação e manutenção são baixos. Os custos unitários da água bombeada já são competitivos, e com a ampliação e massificação do seu uso acompanhado do espetacular decréscimo do custo de módulos FV (fotovoltaico) nos últimos anos, com certeza o tornarão largamente competitivos. Porém, há fatores que podem ser melhorados ou aperfeiçoados para acelerar a sua competitividade como por exemplo a padronização no processo de elaboração do projeto do sistema de bombeamento de água FV.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Principal

Modelar um Sistema de Suprimento de água FV para diferentes condições climáticas, utilizando RNA

1.1.2 Objetivos Específicos

- *Levantar curvas características do sistema de bombeamento de água FV para diversas alturas manométricas;
- *Modelar a curva característica do sistema de bombeamento de água FV, utilizando RNA (Rede Neural Artificial) e expressões polinomiais;
- *Simular o funcionamento de SBFV para diferentes condições climáticas;
- *Dimensionar o tanque de armazenamento do sistema de suprimento de água FV.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O uso pioneiro e demonstrativo de um sistema de bombeamento fotovoltaico foi em 1964 na União Soviética. O volume de água bombeada e a altura manométrica eram muito pequenos para qualquer aplicação prática. Os primeiros sistemas comerciais surgiram no final da década de 1970 e desde então o número de SBFVs vem aumentando, seja pela difusão natural com a evolução da tecnologia, pela crescente preocupação com o meio ambiente ou pela potencialidade do seu uso para eletrificação rural em locais remotos e pobres.

Assim, o bombeamento fotovoltaico tem sido um tema bastante estudado em seus múltiplos aspectos tecnológicos, econômicos, eletrificação rural e mitigação da pobreza, entre outros. Uma parte importante dessas pesquisas diz respeito à predição e otimização do desempenho de SBFV, que será o tema desse projeto de pesquisa.

Arab et al. (5) modelaram a performance de um Sistema de Suprimento de água FV em 4 localidades diferentes da Argélia, e para várias configurações diferentes, variando o tamanho do reservatório, o tipo de bomba utilizado e a quantidade de células solares utilizadas. Eles concluíram que a localização geográfica influenciava independente da configuração, mesmo que as condições do recurso solar fossem parecidas, indicando a dependência de outros fatores ambientais. Esse trabalho foi meramente teórico sem validação com dados ou testes experimentais.

Chaurey et al. (6) investigaram a performance de sete sistemas iguais em localidades diferentes, utilizando bombas centrífugas AC com conversores DC-AC. Os sistemas foram projetados para alturas manométricas de 15 a 50 metros e uma demanda média de 35m³ por dia. Eles concluíram que a eficiência global do sistema sempre diminuía quando se afastava da altura de bombeamento de projeto, porém, os sistemas ainda assim, poderiam ser utilizados em diferentes alturas com eficiência razoável, pois eles ainda eram capazes de suprir a demanda das suas respectivas localidades.

Hamza e Taha (7) fizeram testes de campo em sistema de irrigação e consumo humano em 3 áreas remotas do Sudão. Eles realizaram testes de curta duração e testes de longa duração. Os testes de curta duração foram feitos para obter as curvas características do sistema, para estimar a eficiência do sistema e o nível de radiação

crítica (o nível para o início do bombeamento). Os testes de longa duração foram feitos para mensurar o volume bombeado diariamente para o total de irradiação solar diária. Com essas informações foi possível fazer uma previsão de quantidade de água bombeada por dia com um erro entre 10-25%.

Uma modelagem mais flexível foi a de Jafar (8), que desenvolveu um modelo para prever a água bombeada em um sistema para uma combinação variada de irradiação e altura manométrica. Ele realizou os experimentos em uma linha pressurizada que simulava as diversas alturas manométricas. Posteriormente ele relacionou os termos da curva característica com a altura manométrica, com 8% de erro, porém, ressalta-se que esse experimento foi realizado apenas em dias de céu claro, de modo que ela não é aplicável em todas as situações climáticas.

Um dos componentes que tinha grande importância na otimização de uso e custo de um SSBFV é o tanque de armazenamento; por isso, Vilela e Fraidenraich (9) desenvolveram uma metodologia para otimizar o tamanho de um tanque de armazenamento para um sistema de suprimento de água. Partindo da equação característica de um sistema e da irradiação, calculada a partir de um modelo, o reservatório foi dimensionado de modo a equilibrar o custo de produção do tanque e a probabilidade de perda de abastecimento.

Gad e Gayar (10) estudaram teoricamente um SBFV e desenvolveram em MATLAB um programa que modela fisicamente todos os componentes do sistema para realizar a previsão da sua performance. Além disso, Gad e Gayar também otimizaram o ângulo de inclinação do arranjo de modo a obter uma melhor eficiência do sistema. O estudo não foi validado com dados ou testes experimentais.

Posteriormente Hamrouni et al.(11) fizeram pesquisa teórica e experimental na Tunísia, estudando um sistema que era composto pelo arranjo FV, conversor DC-DC e inversor DC-AC, motor assíncrono e tanque de armazenamento. Eles modelaram cada componente do sistema (arranjo PV, conversor, motor e bomba) separadamente e utilizaram a irradiação solar e a temperatura ambiente como entrada para simular os resultados e compararam com dados experimentais. Eles relataram que quando a irradiação se mantinha constante tanto a saída do gerador quanto o volume de água bombeada podiam ser estimados sem grandes erros, mas o desempenho modelado

do bombeamento era muito degradado com a mudança nas condições meteorológicas (situação com variabilidade do recurso solar).

Uma abordagem mais completa para a otimização foi a de Muhsen et al. (12); eles propuseram um método multiobjectivo de otimização do tamanho do arranjo e testaram o sistema por um período de 365 dias. Além do critério econômico, também foi utilizado o critério de confiabilidade, ou seja, a probabilidade de perda de abastecimento. Eles concluíram que o sistema de bombeamento FV com o tanque de armazenamento mitigava muito efeito imprevisível da irradiação do sol, sendo que no ano inteiro apenas houve um déficit de 9 dias. Um diferencial desse trabalho é que a modelagem do painel fotovoltaico foi confrontada com os módulos em testes práticos.

Paralelo ao estudo dos SBFV o uso de técnicas de inteligência artificial foi também sempre crescente ao longo dos anos na resolução de diversos problemas. As redes neurais artificiais, por exemplo, já têm um longo histórico de aplicações em energias renováveis, seja para estimar as condições atmosféricas e assim calcular a irradiação direta e difusa, estimar a velocidade do vento, a temperatura do ar, ou mesmo para fazer previsões do funcionamento de sistemas fotovoltaicos ou solar térmicos.

Rehman e Mohande(13) aplicaram uma rede com as variáveis de entrada, sendo número do dia, irradiação global, temperatura ambiente e umidade relativa, para estimar a irradiação direta e difusa no plano horizontal; eles obtiveram um erro absoluto percentual médio de 0,016 para a irradiação direta e 0,41 para a irradiação difusa.

Também foram bastante utilizados métodos de Inteligências Artificiais para prever os diversos tipos de comportamento de sistemas FV, Fernández et al.(14), por exemplo, modelaram uma RNA para determinar a temperatura operacional de uma célula FV em função da irradiância incidente, da temperatura do ar e velocidade do vento. O sistema possuía concentração solar de modo que a temperatura alcançou aproximadamente 90°C e o RMSE de sua estimativa foi de apenas 3,24°C ou 4,8%.

Na área de otimização de sistemas, Veerachary e Yadaiah (15) propuseram uma aplicação de RNA para identificar o melhor ponto de funcionamento de um sistema FV acoplado a um motor, ou seja, um seguidor de máxima potência baseado em RNA. A rede foi treinada por um algoritmo de segmento de máxima potência tradicional, mas também foi considerado o torque do motor utilizado, de modo que

além de procurar o ponto em que o arranjo fornecia a máxima potência também procurava o ponto em que o motor desenvolvia a máxima potência. O controle em RNA foi testado para diferentes níveis de insolação solar e os valores foram satisfatórios em relação a valores obtidos por controles mais complexos, que já são utilizados atualmente. De acordo com os autores também foi possível utilizar o controle para conjuntos de motores em série.

Os trabalhos citados acima retratam um breve histórico dos avanços das pesquisas em SBFV e do uso de RNA aplicado à energia solar, porém, atualmente as pesquisas na área de SBFV concentram-se principalmente em 3 áreas, que são: o estudo de bombeamento híbrido; a otimização do funcionamento do SBFV e por fim a estimativa de funcionamento e otimização de projeto de SBFVs, semelhante ao que será desenvolvido nesse trabalho.

No campo do bombeamento híbrido, pode-se citar o estudo recente de Bakeli e Kaabeche (16) que modelaram e compararam o funcionamento de sistema de bombeamento fotovoltaico, com bombeamento a diesel e bombeamento híbrido diesel-FV. Eles chegaram à conclusão que o sistema fotovoltaico era mais barato que o sistema a diesel, porém, houve algumas configurações híbridas em que o sistema conseguia uma confiabilidade maior a um custo menor que o fotovoltaico. Nekkache et. al (17) e Sba et al. (18) realizaram algo parecido, porém com sistemas fotovoltaico-eólico. Eles utilizaram técnicas de otimizações para determinar o tamanho ideal de cada tipo de gerador (eólico ou fotovoltaico) tendo como alvo tanto o critério econômico quanto o critério de confiabilidade do sistema de bombeamento. As conclusões foram semelhantes para ambos os estudos, o SBFV era mais economicamente viável para probabilidades de perda de abastecimento maiores de 0,1%; caso contrário o bombeamento híbrido era mais viável economicamente.

No campo da otimização de funcionamento dos SBFV pode-se citar um extenso estudo realizado por Hadwan e Alkholidi(19), que analisaram um grande número de sistemas de suprimento de água localizados no Iêmen. Os autores identificaram os principais problemas que degradavam a eficiência dos sistemas já instalados e chegaram à conclusão que muitos problemas cujas soluções já eram conhecidas nos meios acadêmicos, mas que acabavam sendo ignoradas na prática, como o sombreamento dos módulos, por exemplo. Nesse campo também houve avanços como os estudos de Djeriou et al. (20), que desenvolveram um algoritmo de controle

de velocidade do motor da bomba que funcionava em conjunto com o seguidor de máxima potência, e isso possibilitou o aumento de fluxo do SBFV.

A área de previsão de funcionamento e de otimização de projeto de SBFV, onde se localiza esse trabalho, também é uma das áreas de estudos de SBFV mais dinâmica da atualidade, ou seja, onde encontram-se os maiores esforços para o desenvolvimento dessa tecnologia. Os trabalhos a seguir são uma parte representativa das pesquisas realizadas nessa área.

Benghanem, Daffalah e Almohammedi(21) utilizaram uma versão adaptada da tradicional modelagem polinomial, porém, mais abrangente, que foi possível determinar a quantidade de água bombeada a partir de dados de irradiação solar, da altura manométrica e de uma modelagem do arranjo fotovoltaico, conseguindo um erro de 7% em 4 localidades da Arábia Saudita.

Meunier et. al(22) modelaram fisicamente todos os componentes de um SBFV padrão instalado em Burkina Faso (centro da África), para assim conseguir simular o seu comportamento para as diversas localidades. Eles conseguiram uma precisão de 95% utilizando dados climáticos locais, e 91% de acurácia utilizando dados de satélites.

Muhsen, Khatib e Abdulabbas(23) otimizaram o tamanho do SBFV utilizando o método da solução ideal integrado com o método da hierarquia analítica partindo de critérios técnicos-econômicos. A probabilidade de perda de abastecimento (PPA) e o excesso de volume de água (V_{ex}) foram os critérios técnicos; o custo nivelado de água bombeada (CNAB) foi o critério econômico. Eles obtiveram uma PPA de 0,04%.

Badi et al.(24) criaram uma metodologia para o dimensionamento de um SBFV ótimo para substituir um sistema de bombeamento diferente já existente, a partir de um modelo em MATLAB e realizaram testes experimentais para validação do modelo. O diferencial desse trabalho foi que eles instalaram o sistema na zona rural de Omã com o intuito de verificar a redução da emissão de gases do efeito estufa, pois o sistema substituído utilizava diesel. Eles concluíram que a substituição do bombeamento a diesel por um SBFV foi capaz de reduzir a emissão de CO₂ em pelo menos 13950 Kg por ano.

Yaichi et al.(25) também tentaram prever a quantidade de água bombeada para qualquer altura, porém eles não se preocuparam com todo o sistema; eles utilizavam como entrada na modelagem já a saída de energia do arranjo FV, que já é bem conhecida na literatura; assim eles focavam o modelo na bomba e na altura manométrica. Posteriormente eles confrontaram o modelo com dados experimentais e alcançaram um erro de 3%. Outro diferencial da metodologia desenvolvida nesse estudo, segundo os criadores, pode ser utilizado em outros sistemas fotovoltaicos autônomos.

Todos esses trabalhos citados acima, que focam em modelagem de SBFV ou do SSAFV, têm a limitação de serem de aplicação local e por isso, o seu uso é inviável para condições diferentes das que foram experimentadas e, além disso as estimativas resultantes são de baixa precisão. Os outros trabalhos, que possuem uma modelagem um pouco mais flexível, têm a precisão da estimativa muito degradada para condições meteorológicas com grandes variabilidades.

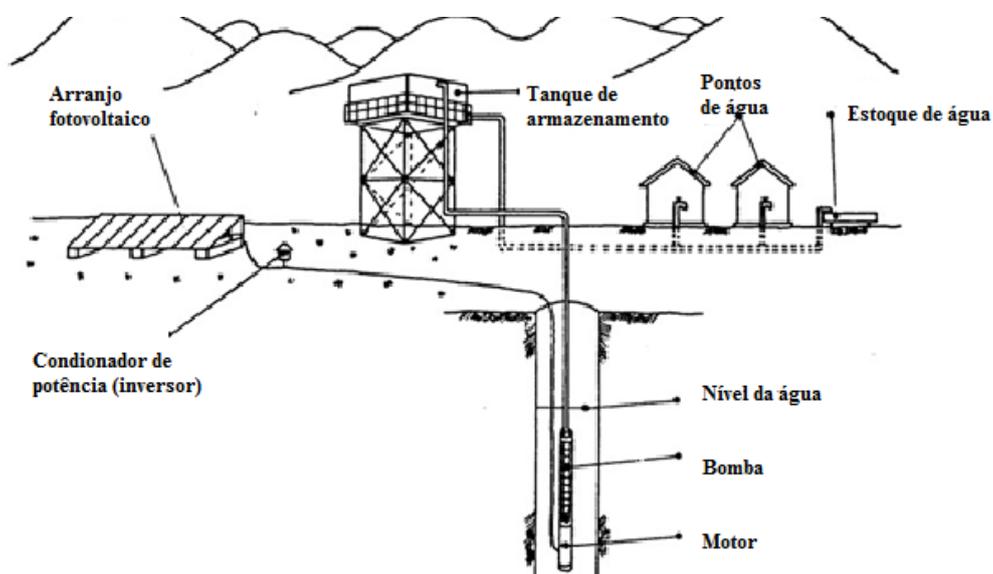
O trabalho aqui desenvolvido pretende criar uma metodologia que utiliza os dados experimentais da bancada de testes de um sistema de bombeamento FV padrão, instalado em Recife, para fazer modelagens do volume bombeado de água em quaisquer localidades, sem grande perda de precisão e com a utilização de dados locais comum em estações meteorológicas convencionais. Com isso, tem-se a possibilidade de fazer uma simulação detalhada do desempenho de um sistema de bombeamento FV padrão (previamente ensaiado em uma bancada de testes) em condições climáticas quaisquer.

3 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

3.1 SISTEMA DE BOMBEAMENTO FOTOVOLTAICO

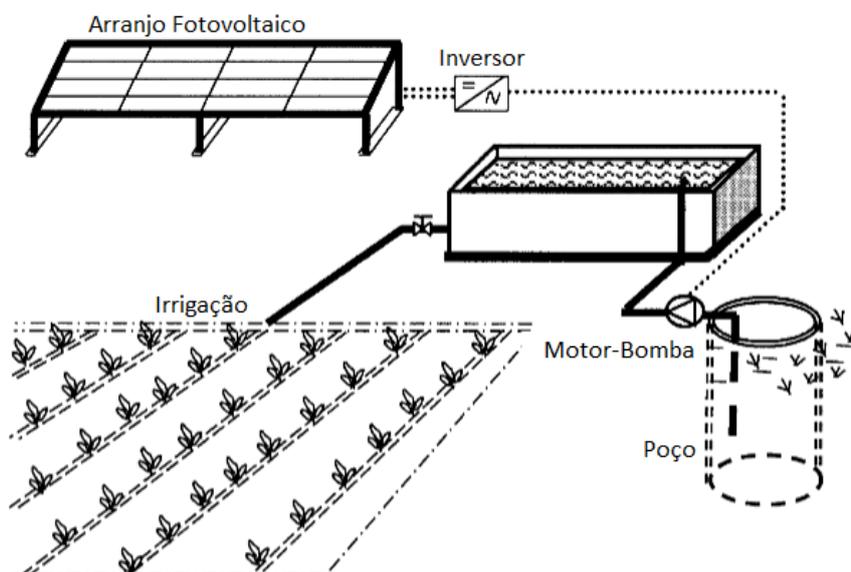
Os sistemas de abastecimento de água são constituídos por uma fonte, um conjunto de bombeamento mecânico, um sistema energético (fotovoltaico), um tanque de armazenamento e um sistema de atendimento à demanda. Esses sistemas de abastecimento de água rural podem ser para uso doméstico ou para fins de irrigação, conforme podem ser vistos nas Figuras 3 e 4. A fonte de água pode ser superficial ou subterrânea, porém, a sua disponibilização ao consumo vai requerer sempre gastos de energia, seja para a elevação e/ou para compensar as perdas por fricção nas tubulações de transporte. Com a escassez e custo crescente da água, muitas aplicações domésticas ou industriais em regiões urbanas ou próximas estão sendo supridas por águas subterrâneas ou pela reutilização da água servida.

Figura 3: Sistema de abastecimento de água FV para fins de consumo doméstico



Fonte: Barlow, R. (1993), World Bank(26)

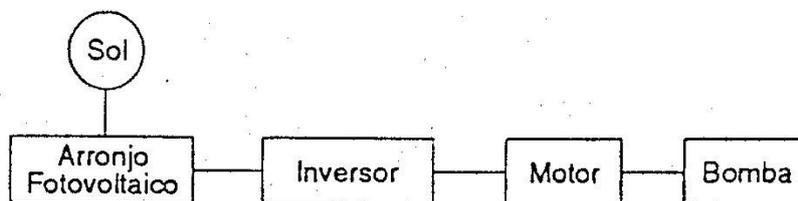
Figura 4: Sistema de abastecimento de água FV para fins de irrigação



Fonte: Hamidat et al (2003)(27)

Ao longo do tempo, diferentes configurações de sistemas de bombeamento fotovoltaico foram estudadas e avaliadas. Assim, por exemplo, algumas incluíam um sistema de armazenamento da eletricidade gerada em baterias; outras, onde a instalação do motor era na superfície e havia uma transmissão mecânica para a bomba submersa. Porém, a configuração predominante na atualidade tende aos sistemas mais simples, que consistem basicamente do arranjo fotovoltaico, inversor, motor e bomba, conforme pode ser visto na Figura 5. Existem ainda sistemas mais simples que prescindem do uso do inversor e fazem uso do motor de corrente contínua. Em ambos os casos, entre o arranjo e o inversor ou motor DC pode existir um sistema conhecido como seguidor do ponto de máxima potência (PMP), que permite uma operação mais eficiente nas situações em que a radiação solar tem um nível relativamente baixo. É imprescindível relatar que, de maneira geral, os sistemas de bombeamento com inversor (AC) são para potências maiores que $1500 W_p$ e os de corrente contínua para potências até $1000 W_p$; no intervalo de 1000 a $1500 W_p$ os motores de corrente alternada dominam, mas não são tão numerosos quanto para potências maiores.

Figura 5: Configuração predominante do Sistema de Bombeamento de água FV

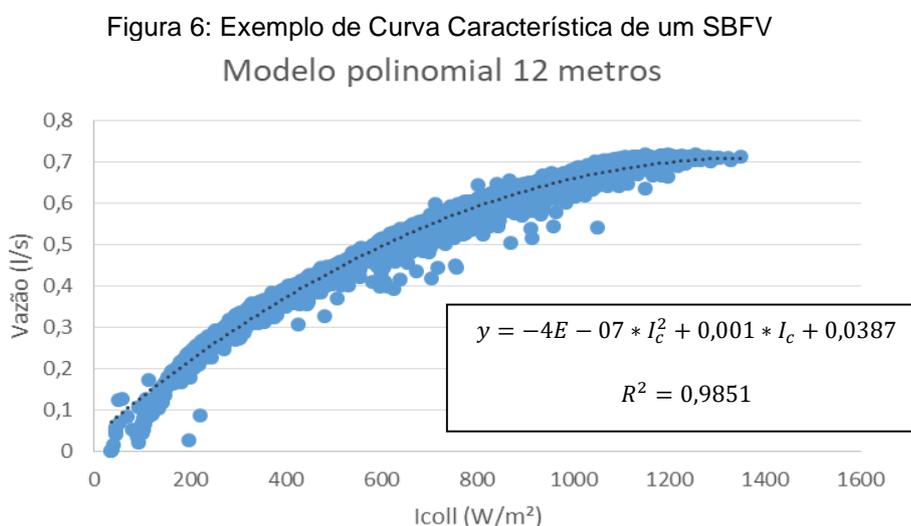


Fonte: Oliveira, 2004(28)

Existem características inerentes a qualquer SBFV, independentemente do tamanho, localização, configuração ou qualquer outro fator físico. Uma dessas características é a existência de uma irradiação crítica, que é o nível de irradiação mínimo necessário para que o sistema comece a bombear água, e que depende da altura em que a água será transportada, do tamanho do arranjo fotovoltaico, dos tipos de equipamentos utilizados, sejam os equipamentos elétricos como o motor a bomba e o inversor, como também do material e tamanho da tubulação e tipo de válvulas que possa vir a existir no sistema. A irradiação crítica pode ser entendida como a energia mínima necessária para vencer a altura manométrica e as perdas de cargas; por isso ela nunca poderá ser zero.

Outra característica inerente ao sistema é que a quantidade de água bombeada não é linear com a radiação solar. Isso ocorre porque o aumento da vazão causa um aumento da velocidade em que o fluido percorre a tubulação, e a perda de carga depende do quadrado da velocidade de escoamento, além de outros fatores que se mantêm constantes para um mesmo sistema. Por isso, o aumento da vazão causa o aumento também da perda de carga. Outra fonte da não linearidade é que a produção de eletricidade por um módulo FV em condições de alta irradiação e baixa velocidade do vento faz com que o módulo fotovoltaico atinja alta temperatura e sua eficiência de conversão elétrica cai. Pelo que antecede é intuitivo modelar a vazão de um SBFV em função da irradiação incidente no plano do módulo FV a uma dada altura manométrica, aproximadamente por uma equação de segundo grau. Essa curva é conhecida como equação característica do SBFV. Para efeito de ilustração, a figura 6 mostra a curva característica de um SBFV para 12 metros de altura de recalque. A irradiação crítica,

nesse caso, é aproximadamente, 75 W/m^2 , e pode-se verificar que o polinômio de segundo grau ajusta bem os dados experimentais.



Fonte: Coutinho et. All (29)

3.2 GERADOR FOTOVOLTAICO

O gerador fotovoltaico é um arranjo formado por um ou mais “strings” de módulos fotovoltaicos em paralelo. O módulo é composto por células solares de um material semicondutor, como o silício por exemplo, que produzem energia elétrica por meio do efeito fotovoltaico.

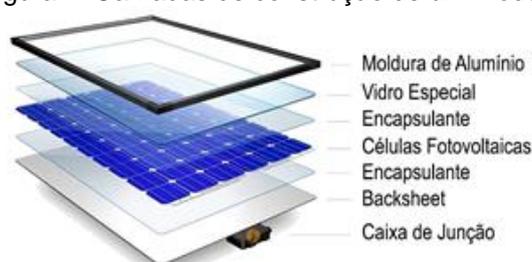
O efeito fotovoltaico é a emissão de elétrons por um material, geralmente metálico, quando exposto a uma radiação eletromagnética (nesse caso a luz do sol) de frequência suficientemente alta; o nível necessário da frequência depende do material no qual ela incide(30).

O silício, que é o material utilizado na maioria das células comerciais, é facilmente encontrado na natureza, mas, para ser utilizado nas células fotovoltaicas ele tem que passar por processos de purificação até que a concentração de impurezas seja inferior a 0,2 ppm (partes por milhão) e por técnicas para a criação de lingotes dos cristais de silícios. Estes são cortados em lâminas que passam por processos

como limpeza, texturização, difusão de dopantes, deposição de filmes antirreflexos e de contatos metálicos que canalizam a energia elétrica produzida(31).

As células fotovoltaicas têm uma tensão de circuito aberto geralmente menor do que 1 volt, e têm uma corrente de curto circuito que varia de acordo com o tamanho da célula, do semicondutor utilizado em sua fabricação e da irradiação solar incidente. Para obter maiores tensões e potências, as células são agrupadas em série ou paralelo para formarem os módulos que são envelopados para garantir proteção contra as intempéries ambientais como mostrada na figura 7.

Figura 7: Camadas de construção de um Módulo FV

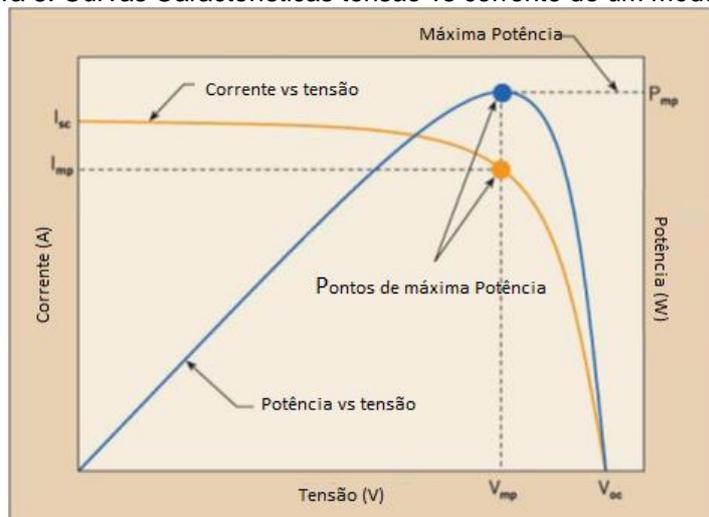


Fonte: Portal solar (31)

A moldura tem o objetivo de atribuir rigidez mecânica ao conjunto; é feita de alumínio porque este tem características de rigidez satisfatória, é relativamente leve e não se degrada com o tempo, mesmo exposto ao sol e a outras intempéries. O vidro é utilizado para proteger o módulo das intempéries, deve ter uma elevada transparência, resistência mecânica e dureza; o encapsulante serve como suporte estrutural às células, isolando-as eletricamente e protegendo-as contra a degradação; é geralmente feito de Acetato de Vinila ou Polivinil Butiral, ambos materiais poliméricos. A backsheet nada mais é do que uma chapa na parte de trás do módulo. A caixa de junção é onde a sequência de células tem seus terminais para o mundo externo.

Os módulos solares, por sua vez, possuem curvas características de tensão por corrente. A figura 8 mostra uma curva representativa para qualquer tipo de módulo, ou seja, seu formato de joelho ocorre para qualquer célula.

Figura 8: Curvas Características tensão vs corrente de um módulo FV



Fonte: Eletrical Construction & Maintenance (32)

Os pontos de tensão e corrente de circuito aberto, curto circuito e máxima potência, na figura 8, variam entre os diferentes tipos de células como também variam para uma mesma célula expandindo ou retraindo, de acordo com a temperatura ou irradiação; a curva laranja é de corrente vs tensão e a azul é a de potência vs tensão. O ponto destacado em ambas as curvas é o ponto de máxima potência (PMP) com sua respectiva corrente e tensão de máxima potência; ele também varia com a curva, dependendo da radiação incidente, efeito mostrado na figura 9, e dependendo da temperatura, efeito mostrado na figura 10. Sendo assim, qualquer carga que opere próximo a esse ponto recebe o máximo de potência elétrica do gerador. Na figura 8 também é possível observar o destaque de importantes pontos como: a tensão de circuito aberto que é representada por V_{oc} que é a tensão máxima que o painel consegue gerar, bem como a corrente de curto circuito, representada por I_{sc} , que é a corrente máxima que o painel pode prover; essas características inclusive são as que se encontram impressas nas etiquetas como informação nominal dos fabricantes.

Com essas informações é possível calcular o fator de forma (FF) que é o quanto a curva I vs V se aproxima de um retângulo e é calculado por:

$$FF = \frac{I_{mp} * V_{mp}}{I_{sc} * V_{oc}} \quad (1)$$

Onde FF= fator de forma;

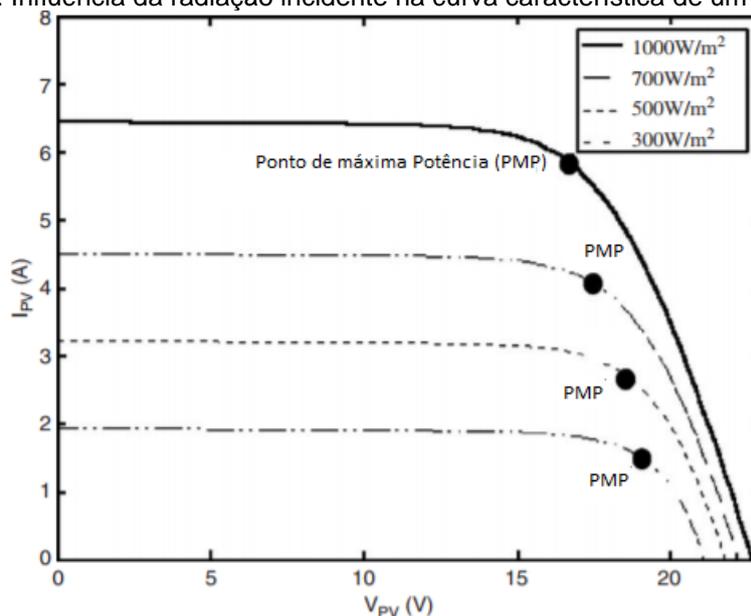
I_{mp} = Corrente de máxima potência

V_{mp} = Tensão de máxima potência

I_{sc} = Corrente de curto circuito

V_{oc} = Tensão de circuito aberto

Figura 9: Influência da radiação incidente na curva característica de um módulo FV



Fonte: V. Salas et al, 2006 (33)

Percebe-se na figura 9 que a diminuição na irradiação causa a diminuição de potência gerada, bem como da tensão de circuito aberto e da corrente de curto circuito, porém, o fator de forma pode ou não variar consideravelmente, dependendo do processo de fabricação do módulo, sendo que, independentemente do tipo de módulo para irradiações maiores que 500 W/m^2 , o FF é praticamente constante. (34)

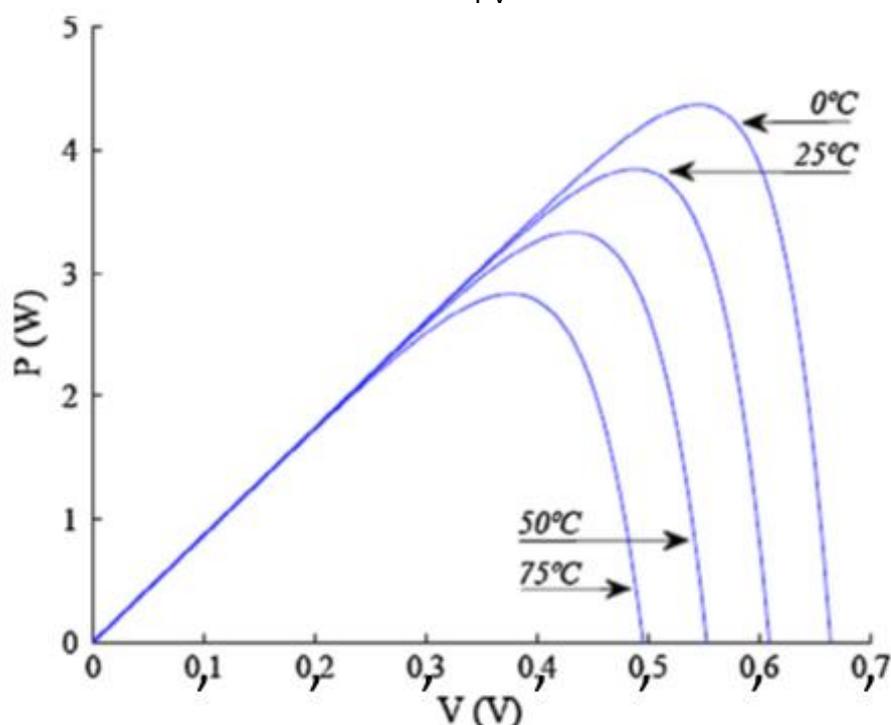
Um conjunto de módulos em série ou paralelo também possui sua curva característica; sendo assim, o conjunto também tem ponto de máxima potência; então deve-se construir o arranjo de modo que a carga esteja próxima do ponto ótimo.

Como dito anteriormente, a temperatura também tem uma grande influência na produção de energia do módulo, sendo que quanto maior a temperatura, menor a eficiência, a qual é definida pelo quociente da potência gerada pelo produto da radiação incidente no plano do painel pela área, e por consequência também a produção de energia do módulo; na figura 10 vê-se o efeito da variação tanto da

potência como do ponto onde acontece a máxima potência em um módulo (pico da curva), quando a temperatura varia de 0°C a 75°C . Quanto ao fator de forma, ele pouco varia com a temperatura.(34)

Quando varia a temperatura, os comportamentos da corrente de curto circuito, da tensão de circuito aberto, do ponto de máxima potência e do FF podem ser determinados utilizando modelos elétricos. (35)

Figura 10: Influência da temperatura de funcionamento na curva característica de um módulo FV



Fonte: K. A. Moharram, et al., 2013(36)

Pode-se afirmar que é uma atividade complexa estabelecer a temperatura instantânea de funcionamento do módulo fotovoltaico a partir das condições ambientais. Dentro do semicondutor, quando exposto a fótons da luz solar, além da geração de energia acontece também a degradação da luz na forma de calor; além disso, ainda tem a transferência de calor; por convecção e irradiação acontecendo em ambos os lados do painel. A condução é desconsiderada porque no estado estacionário ela atua apenas transferindo o calor do interior para as superfícies exteriores dos painéis. (36)

Sendo assim, no estado estacionário, a temperatura de funcionamento do módulo pode ser determinada a partir das características térmicas e físicas dos módulos, dados solares, dados climáticos e do coeficiente de transferência de calor do vento. Em 2008 E. Skoplaki, Boudouvis e Palyvos. (37) desenvolveram a seguinte correlação:

$$T_c = T_a + \left(\frac{0,32}{8,91+2*V_f} \right) G_t V_f > 0 \quad (2)$$

Onde: T_c = temperatura da célula/módulo (°C)

T_a = Temperatura Ambiente (°C)

V_f = Velocidade do Vento (m/s)

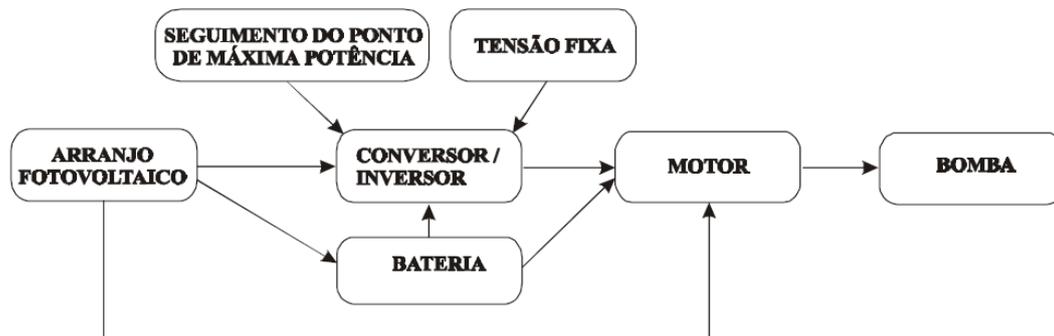
G_t = Irradiação Solar (W/m²)

Essa relação semiempírica relaciona a temperatura de operação do painel com variáveis ambientais facilmente obtidas.

3.3 SISTEMA DE ACOPLAMENTO GERADOR-CARGA

A ligação do gerador fotovoltaico com o conjunto motor-bomba pode ser feita de duas maneiras, dependendo do motor que será alimentado. Caso seja um motor de corrente contínua, a ligação pode ser feita diretamente, mas pode ser colocado um banco de baterias e um conversor de corrente contínua com ou sem seguidor de máxima potência. Caso o conjunto motor-bomba seja de corrente alternada, coloca-se um inversor que converte a corrente contínua em corrente alternada com ou sem o seguidor de máxima potência. Um resumo das configurações usadas pode ser visto na figura 11.

Figura 11: Formas de ligações possíveis entre o gerador e a carga



Fonte: Oliveira (28)

3.3.1 Seguidor de Máxima Potência

Um seguidor de máxima potência consiste em um equipamento com um circuito de controle com um algoritmo de rastreamento para condicionar o gerador fotovoltaico a operar no ponto ótimo e dessa forma obter a máxima eficiência no gerador.

3.3.2 Ponto de Trabalho Fixo

Quando não se tem o seguidor de máxima potência, pode-se trabalhar com um ponto de tensão fixa, ou seja, escolhe-se uma tensão próxima à tensão de potência máxima e com ajuda de um controlador, geralmente embutido no inversor ou conversor, mantém-se a carga trabalhando próxima desse ponto. Esse modo de trabalho é menos eficiente do que com o seguidor de máxima potência.

No conversor ou inversor também existe um sistema de controle responsável por controlar a tensão e a frequência que serão repassadas ao motor; há aplicações que precisam de uma relação entre tensão e frequência constante ou variável; esse controle pode ocorrer de duas formas: por meio de um controle escalar ou um controle vetorial. O controle vetorial permite mais precisão no controle da velocidade, principalmente em baixas velocidades.

Na visão do inversor, o arranjo fotovoltaico nada mais é do que uma fonte de corrente variável, na qual a corrente depende da irradiação e não há controle na sua

geração; por isso, dependendo das condições ambientais, da baixa irradiação, o funcionamento do sistema será interrompido. Caso a corrente requerida pelo conjunto inversor + motor para vencer o torque seja maior que a produzida pelo arranjo fotovoltaico para a intensidade solar do momento, o controlador desloca a tensão de operação do gerador para aumentar a corrente. Caso a tensão caia abaixo do limite de trabalho do controlador, o sistema é então desligado.

3.4 MOTORES ELÉTRICOS

Há principalmente dois tipos de motores elétricos:

- Motor de corrente alternada;
- Motor de corrente contínua.

3.4.1 Motores de Corrente Alternada

Os motores de corrente alternada são os mais utilizados no mundo inteiro por causa de sua simplicidade, do baixo custo e sua grande faixa de potência que ele pode ser construído. Existem motores de corrente alternada desde potências menores que 1 HP até maiores que 500 HP. Os motores de corrente alternada são classificados em duas categorias: síncronos e de indução. Nas máquinas síncronas, as correntes do enrolamento do motor são fornecidas através de contatos rotativos fixados diretamente na parte estacionária do motor. Nas máquinas de indução, as correntes são induzidas nos enrolamentos do rotor por meio de combinação da variação, no tempo, de correntes no estator e do movimento em relação ao estator. (38) Eles podem ser assíncronos (também chamado de indução) ou síncrono. Os motores de indução são mais utilizados do que os síncronos e são especialmente mais comuns ainda nas aplicações fotovoltaicas; então, nessas aplicações, necessariamente, tem-se que usar esse tipo de motor associado com um inversor, o que gera mais um estágio para dispersão de energia no sistema, mas, atualmente, existe inversores com eficiência acima de 95% voltados para aplicação fotovoltaica.

Esses motores são muito robustos, requerem pouca manutenção e possivelmente têm altas potências. Conseqüentemente, são os mais adequados para bombas submersas e/ou para abastecer um grande volume de água.

3.4.2 Motores de Corrente Contínua

Os motores de corrente contínua são de dois tipos, com ou sem escovas; ambos os motores podem ser usados facilmente em aplicações fotovoltaicas devido à compatibilidade com o tipo de corrente (o gerador entrega em corrente contínua); são mais eficientes que o de corrente alternada mas também requerem manutenção periódica. O que possui escova, requer que estas sejam substituídas de tempos em tempos e os que não possuem escovas possuem um dispositivo eletrônico extra, que faz o papel das escovas mas aumenta o risco de falha. A curva de carga desse tipo de motor também é difícil de adaptar as características do gerador fotovoltaico que varia com a irradiância. Como esses motores requerem uma manutenção periódica, eles não são usados com bombas submersas apenas para poços rasos e fontes de água superficiais; os mesmos não são usados onde requer uma grande quantidade de água bombeada.

3.5 BOMBAS HIDRÁULICAS

As bombas hidráulicas são máquinas operatrizes que transferem energia ao fluido com a finalidade de transportá-lo de um ponto ao outro; nesse processo o fluido sofre um aumento de pressão, de velocidade ou de pressão e velocidade.

As bombas hidráulicas podem ser divididas em dois grandes grupos:

- Bombas dinâmicas (de fluxo): Centrífugas, mistas ou axiais.
- Bombas de deslocamento positivo (volumétrica).

3.5.1 Bombas Dinâmicas

As bombas dinâmicas são caracterizadas pela presença de um rotor com pás que ao girar transmitem energia para o fluxo. Outro elemento comum na mesma é o difusor; nele é feita a conversão da energia cinética do fluido, devido às altas velocidades de rotação do rotor, em energia potencial de pressão, devido ao seu formato que tem seção transversal gradativamente crescente.

As bombas centrífugas são aquelas em que a energia transferida ao fluido é em um primeiro momento cinética e só depois transformada em energia de pressão. A transferência de energia do rotor ao fluido pode ser dada de maneira centrífuga, de arrasto ou mista.

Na transferência centrífuga, ao girar o motor cria-se uma região de alta pressão na sua extremidade e conseqüentemente uma outra região de baixa pressão no centro, que é por onde o fluido entra perpendicular ao rotor; assim, essa diferença de pressão resulta em uma força que acelera o fluido, aumentando a sua energia cinética dele e ejetando o fluido pela tangente do rotor.

Na transferência de arrasto (bombas desse tipo são chamadas de axiais) o fluido entra perpendicularmente ao rotor que, ao girar, muda a trajetória do fluido para uma trajetória em formato de hélice, causando o arrasto. Apesar de serem classificadas como centrífugas, essas bombas não contam com o efeito dessa força para impulsionar o fluido.

Na transferência mista (também conhecida como diagonais) o fluido entra perpendicularmente ao rotor, mas esse tem um formato com dupla curvatura, e a saída do fluido dá-se uma trajetória de numa hélice cônica, que é uma composição do movimento da força centrífuga e do arrasto.

3.5.2 Bombas Volumétricas

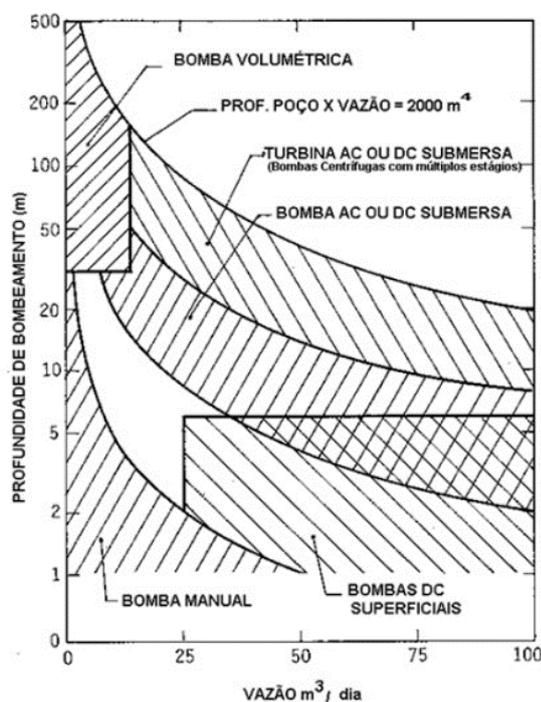
Nessas bombas a transferência de energia para o fluido é feita diretamente na forma de energia potencial de pressão (39). Nela não existe rotor, mas um dispositivo

mecânico que obriga o fluido a se movimentar (esse dispositivo é que determina a classificação das bombas de deslocamento positivo como alternativa ou rotativa).

O movimento é feito conforme sucessivamente o fluido ocupa e é expulso de um volume no interior da bomba; por isso, tem essa nomenclatura. A força transferida ao fluido tem o mesmo sentido do deslocamento e a sua vazão praticamente independe da viscosidade do fluido ou da pressão manométrica do bombeamento. Por isso são ideais para altas pressões, porém, sua vazão é relativamente pequena quando comparada às bombas centrífugas.

A figura 12 mostra um diagrama do uso aconselhável dos tipos de diferentes bombas para as diversas condições de vazão e pressão.

Figura 12: Diagrama do uso aconselhável dos tipos de diferentes bombas para as diversas condições de vazão e pressão



Fonte: Boutelhig et al., 2012 (40)

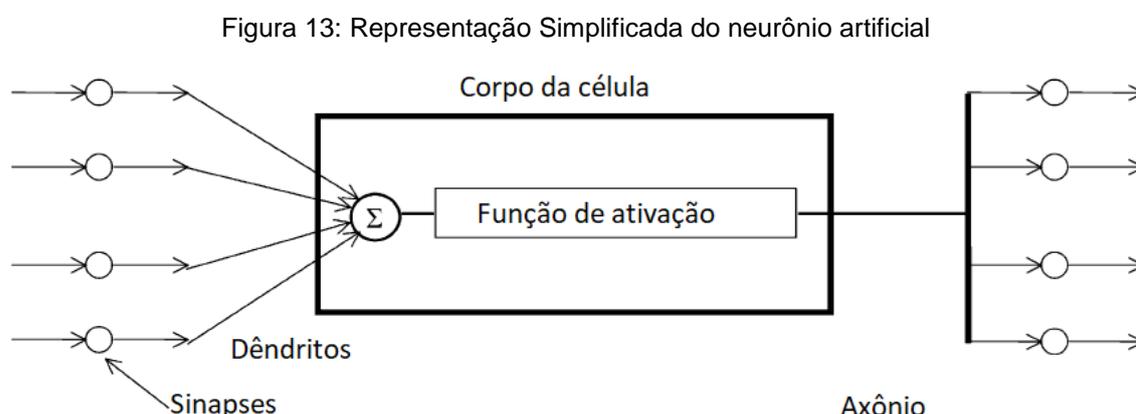
3.6 REDES NEURAIIS ARTIFICIAIS

Redes Neurais Artificiais (RNAs) constituem uma ferramenta de Inteligência Artificial que serve como ferramenta para a solução de problemas complexos. Elas possuem esse nome devido à semelhança com o funcionamento de um cérebro

humano, tanto na arquitetura quanto no princípio de funcionamento. Uma RNA é um conjunto de pequenas entidades que estão ligadas entre si e essas pequenas entidades transferem informações de uma para outra. Sendo assim, cada unidade dessa rede tem dois valores associados a ele, o valor de entrada e o seu peso. A saída da unidade é uma função desses respectivos valores.

3.6.1 Neurônio Artificial

Uma representação do neurônio artificial pode ser vista na figura 13:



Fonte: Kalogirou, 2001 (41)

Uma rede neural é formada por um grupo de neurônios artificiais conectados com outros neurônios de maneira organizada, formando um sistema. (42)

As conexões entre os neurônios artificiais recebem o nome de sinapses; mesmo nome usado para as conexões entre nossos neurônios; que nada mais é do que a troca de informação, ou estímulo, entre os neurônios.

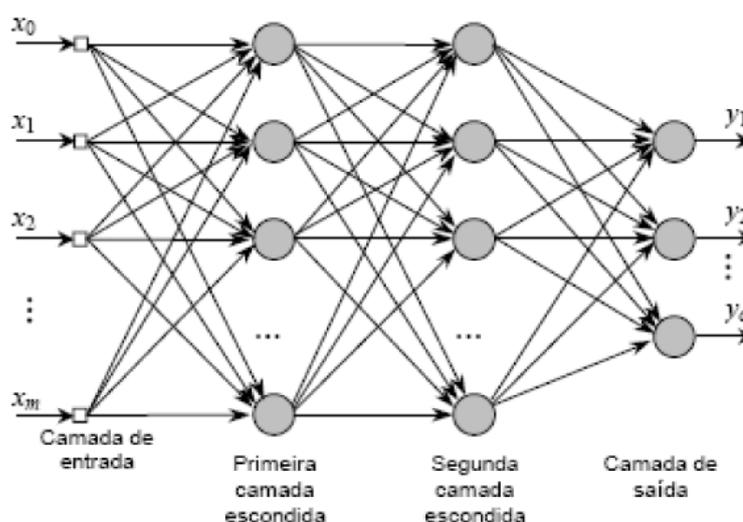
Quando uma excitação é feita na entrada da rede e tem-se um resultado desejado na saída ao longo das sinapses, há o armazenamento de pesos para cada neurônio no caminho e esses pesos são modificados baseados na entrada e na saída. (41)

3.6.2 Princípio de Funcionamento da RNA

A RNA imita o processo de aprendizagem do cérebro humano; o conhecimento é adquirido através do processo de aprendizagem e as conexões entre os neurônios são usadas para armazenar o conhecimento nos formatos dos pesos já citados anteriormente.

Um diagrama da arquitetura de uma RNA pode ser visto na figura 14. As camadas ocultas são assim chamadas porque depois de construída, a RNA funciona como uma caixa preta; o número de camadas ocultas e de neurônios por camadas diferem de uma RNA para outra.

Figura 14: Esquema da arquitetura de uma rede neural com 2 níveis ocultos



Fonte: Oliveira, et al. 2010(43)

O processo de aprendizagem é chamado treinamento, que consiste em modificar os pesos usando um método no qual a entrada é adicionada à rede com a saída, e assim, os pesos são ajustados para que a entrada produza a saída desejada; antes do treinamento, todas as saídas produzidas são aleatórias e descartáveis.

Após o treinamento é feita a verificação; nessa etapa uma entrada é colocada na RNA, que por sua vez produz uma saída. Então a saída produzida pela RNA é comparada com a saída conhecida ou medida e calcula-se o erro; se este for

insatisfatório deve-se treinar novamente a rede, mas com a ressalva que dependendo da arquitetura a rede tem um número de pontos para o treinamento na qual a mesma deixa de aprender e se torna viciada, deixando assim de calcular e começa a associar.

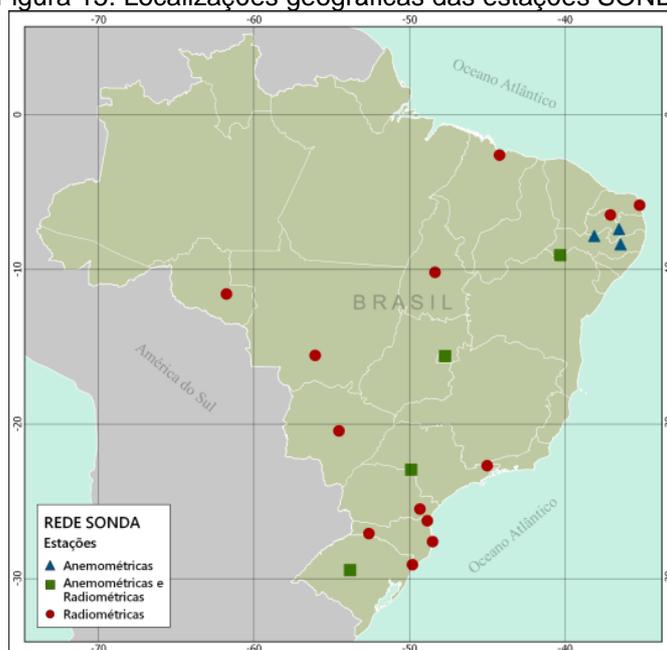
3.7 BANCO DE DADOS DE IRRADIAÇÃO E OUTROS PARÂMETROS METEOROLÓGICOS

3.7.1 Banco de Dados Solarimétricos – Rede SONDA

Para a simulação de comportamento de um SBFV em locais diversos, do experimento, são necessários dados solarimétricos e meteorológicos desses locais. Uma base de dados de boa qualidade é o banco de dados do Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais (SONDA). É um projeto sob responsabilidade do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE); que tem como meta a formação de um banco de dados de superfície confiável para quantificação dos recursos de energia solar e eólica no Brasil.

O Sonda possui uma rede de várias estações de medições espalhadas pelo Brasil e conta também com algumas estações de parceiros. As estações do SONDA podem ser vistas na figura 15; os detalhes de cada estação como seus instrumentos e suas localizações podem ser obtidas no site do projeto. <http://sonda.ccst.inpe.br/index.html> (44)

Figura 15: Localizações geográficas das estações SONDA



Fonte: SONDA, INPE (45)

As estações da rede são divididas em: Anemométricas e Radiométricas. As de interesse desse trabalho são as Radiométricas, que monitoram as variáveis ambientais que podem ser vistas na tabela 1:

Tabela 1: Variáveis medidas nas estações SONDA

Intervalo	Médias de 1 em 1 minuto
Variáveis medidas	Radiação global horizontal
	Radiação direta normal
	Radiação difusa
	Radiação de onda longa
	PAR
	Iluminância
	Temperatura (superfície)
	Umidade relativa
	Pressão atmosférica
	Precipitação de chuva
	Velocidade do vento (10m)
	Direção do vento (10m)

Fonte: Sonda, INPE (45)

Vários fatores podem afetar a confiabilidade dos dados de campo; então, por isso, antes de disponibilizá-los o SONDA submete-os a um processo de validação que tem como objetivo garantir a sua confiabilidade.

O processo de validação de dados baseia-se na estratégia de controle de qualidade de dados adotada pela BSRN (Baseline Surface Radiation Network), que é um banco de dados da WRMC (World Radiation Monitoring Center), sendo que ambos fazem parte do Programa Mundial de Pesquisas Climáticas e igualmente a WRMC procede com relação aos dados da BSRN; a rede SONDA não altera sua base de dados originais, ou seja, o processo não corrige os dados, apenas indica o grau de confiabilidade dos dados para ser consultado pelo usuário, ficando a critério deste o uso ou não dos dados considerados suspeitos.

O controle de qualidade é feito em quatro etapas, onde cada etapa tem o filtro mais refinado que a anterior. As etapas são na ordem: dado suspeito quando fisicamente impossível; dado suspeito quando o evento é extremamente raro; dado suspeito quando é inconsistente com medidas apresentadas por outras variáveis da mesma estação; dado suspeito caso a medida esteja inconsistente quando comparada com a estimativa de modelos computacionais.

Após cada etapa, é atribuído um algoritmo ao resultado do filtro, sendo que a aprovação em cada etapa é critério para continuidade do processo, ou seja, se não houve aprovação em uma etapa, o processo é parado e o dado receberá o código de suspeito nessa etapa.

3.7.2 Banco de Dados do Grupo FAE

Também foram utilizados os dados da base do grupo de pesquisa FAE (Fontes alternativas de Energia) da UFPE. O grupo FAE tem uma rica história de pesquisa no segmento de energias renováveis, mais especificamente solar; possui uma base de dados sólida de várias estações de medições em diferentes períodos de tempo; os dados utilizados nesse trabalho foram colhidos na área de teste do grupo, que está localizada também em Recife-PE (latitude: 08°03'14" S, longitude 34°52'52" W), mesma localidade onde o SBFV estudado encontra-se. Foram utilizados dados dos

últimos quatro anos de Irradiação direta, difusa, global horizontal e inclinada a 23 graus.

A irradiação global horizontal, difusa e direta é medida com ajuda do equipamento de rastreamento Solys da Kippzonem, um equipamento bastante preciso, que consegue rastrear o sol com precisão de 0,1°. Tem a capacidade de acomodar três piranômetros, além de um pireliômetro, que é capaz de medir a irradiação direta. A irradiação difusa é medida encobrendo a abóbada de um dos piranômetros com uma esfera sombreadora, bloqueando assim toda a radiação direta. (Figura 16)

Figura 16: Equipamento de rastreo do sol- SOLYS-2:



Fonte: Autor

As irradiações direta e difusa são medidas por Piranômetros PSP (Precision Spectral Pyranometer- Piranômetro Espectral de Precisão), no caso o modelo CMP6 da Kipp and Zone, um instrumento classe A. (Figura 17)

Figura 17: Piranômetro de precisão da estação FAE



Fonte: Autor

A irradiação direta foi medida por um pireliômetro Eppley modelo SNIP. Este instrumento tem um ângulo de visão de 5° , que permite que apenas o disco solar seja captado pelo sensor. Também é um sensor classe A, figura 18.

Figura 18: Pireliômetro da estação FAE



Fonte: Autor

A irradiação global no plano de 23° em relação à horizontal foi medida por um piranômetro Eppley modelo SSP, com um erro máximo de 3,5%, figura 19.

Figura 19: Piranômetro inclinado 23° da estação FAE



Fonte: Autor

O banco de dados do grupo FAE também possui medidas de temperatura ambiente e velocidade do vento, medidas com os mesmos sensores que serão detalhados mais adiante na seção que descreve a bancada de teste.

3.7.3 Banco de Dados Patos - PB

Foram utilizados dados de uma estação de um projeto particular que foi especialmente cedido pelo prof. Dr. Chigueru Tiba para a utilização nesse trabalho.

3.8 CÁLCULO DE RADIAÇÃO NO PLANO INCLINADO

O conhecimento da irradiação solar incidente em uma superfície inclinada qualquer é necessário para o estudo de balanço de energia na superfície ou para projetar e otimizar um sistema de geração FV. Porém, historicamente as estações meteorológicas, na maioria das vezes, medem apenas a irradiação no plano horizontal e por isso, nesses lugares a única alternativa é a modelagem matemática da irradiação solar no plano inclinado, tendo como entrada a irradiação solar difusa, total e direta, ou uma combinação de duas ou somente uma, todas medidas no plano horizontal.

Perez et al.(46), por exemplo, calcula a irradiação partindo da irradiação global e direta horizontais. Olmo et al.(47) desenvolveu um método em que é possível estimar a irradiação em um plano arbitrariamente inclinado, partindo da irradiação global no plano horizontal, do albedo local e de variáveis que são possíveis de serem obtidas ou calculadas facilmente como: Irradiação global horizontal, irradiação extraterrestre, ângulo de incidência, e o ângulo zênite. O modelo pode ser resumido pela equação 2.

$$G_{\theta} = G \exp(-kt(\theta^2 - \varphi^2)) * F_c \quad (3)$$

Onde: $F_c = 1 + \rho \text{sen}^2\left(\frac{\theta}{2}\right)$

ρ = albedo local

G= Irradiação global horizontal

Kt= relação entre irradiação global horizontal e irradiação extraterrestre

θ = ângulo de incidência solar

φ = ângulo zênite

Esse modelo leva em conta o efeito anisotrópico da reflexão no solo e não leva em conta o efeito do horizonte artificial, mas ainda assim fornece uma boa estimativa para valores instantâneos. A eficácia do modelo foi atestada comparando os seus resultados com a base de dados do Skyscan'834. Essa é uma base de dados bem conhecida que inclui dados de irradiância para diferentes condições de nuvens. Essa modelagem resultou em um erro absoluto médio de 4,8% e desvio quadrático médio de 10,1%.(47)

3.9 MODELAGEM DO SISTEMA DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA FV

Um sistema de abastecimento de água FV com um tanque de armazenamento elevado funciona exatamente com o banco de bateria de sistemas fotovoltaicos autônomos, porém sua natureza de armazenamento é a energia potencial gravitacional. Pela similaridade, o reservatório de água pode ser projetado de forma semelhante ao dimensionamento dos bancos de bateria de um sistema FV autônomo, porém as diferenças a seguir devem ser consideradas. A primeira é que ao contrário

do que acontece com um banco de baterias, que começa a ser carregado mesmo que o nível de radiação solar seja mínimo, no SBFV existe a radiação crítica na qual abaixo dela, nenhuma água é bombeada. A segunda diferença é que a quantidade de água bombeada não é linear com a radiação solar, mas varia de acordo com uma equação de segundo grau.

Uma vez que já se conhece a capacidade de água bombeada pelo SBFV (curva característica) e a demanda exigida pela carga, é possível calcular o nível de carregamento do tanque por meio da seguinte equação de balanço:

$$NCT(t) = NCT(t - 1) - D(t) + Q(t) \quad (4)$$

Onde: NCT= nível de carregamento do tanque

D= demanda

Q= vazão bombeada pelo SBFV

Lembrando que NCT nunca poderá ser maior que a capacidade de armazenamento do tanque e nem menor que zero, ou seja:

$$se\ NCT(t) > NCT_{max} \Rightarrow NCT(t) = NCT_{max}$$

$$se\ NCT < 0 \Rightarrow NCT = 0$$

O déficit nada mais é do que o instante (t) em que não existe água suficiente no reservatório para abastecer a demanda; por isso só faz sentido ser calculado quando o reservatório está vazio, ou seja, $NCT < 0$; caso contrário o déficit é zero. É dado pela equação:

$$Def(t) = |NCT(t - 1) + Q(t) - D(T)| \quad (5)$$

O excesso é quando o tanque está cheio e ainda existe energia suficiente para bombear; nesse caso, o sistema deve ser desligado ou sua energia desviada para outra aplicação ou, se o bombeamento continua, a água bombeada é descartada. O excesso de água bombeada é dado pela equação:

$$Vex = NCT(t - 1) + Q(t) - D(t) - NCT_{max} \quad (6)$$

Com o conhecimento da capacidade de bombeamento pode-se ainda calcular a probabilidade de perda de abastecimento, ou o intervalo de tempo em que faltará água para a aplicação à qual o SBFV deveria abastecer, é dado pela equação:

$$PPA = \frac{\sum_{t=1}^T Def(t)}{\sum_{t=1}^T D(t)} \quad (7)$$

3.10 PERFIL DE DEMANDA DE ÁGUA RESIDENCIAL

O cálculo do balanço de água pela eq. 4 requer o perfil diário da demanda. Se o uso do SBFV for para irrigação, por exemplo, a demanda seria concentrada no período do dia. Para o atendimento residencial (o caso desse projeto) foi utilizado o perfil levantado por Funk e DeOreo (48) em 2011. Nesse trabalho os autores realizaram, em nome da Aquacraft Inc. da California Public Utilities Commission (CPUC), um estudo para obter com precisão o uso final de água nos mais diversos setores da sociedade, tais como residencial, comercial, industrial, prédios públicos e agricultura. O estudo é tão detalhado que investiga por exemplo, quanta água é usada para banho ou para lavar pratos. Os pesquisadores agruparam dados já disponíveis na literatura, dados obtidos de empresas que usavam ou distribuíam água e em pesquisas adicionais em lares. Os resultados do uso de água em residências estão resumidos na tabela 2:

Tabela 2: Demanda do consumo relativo de água diário residencial

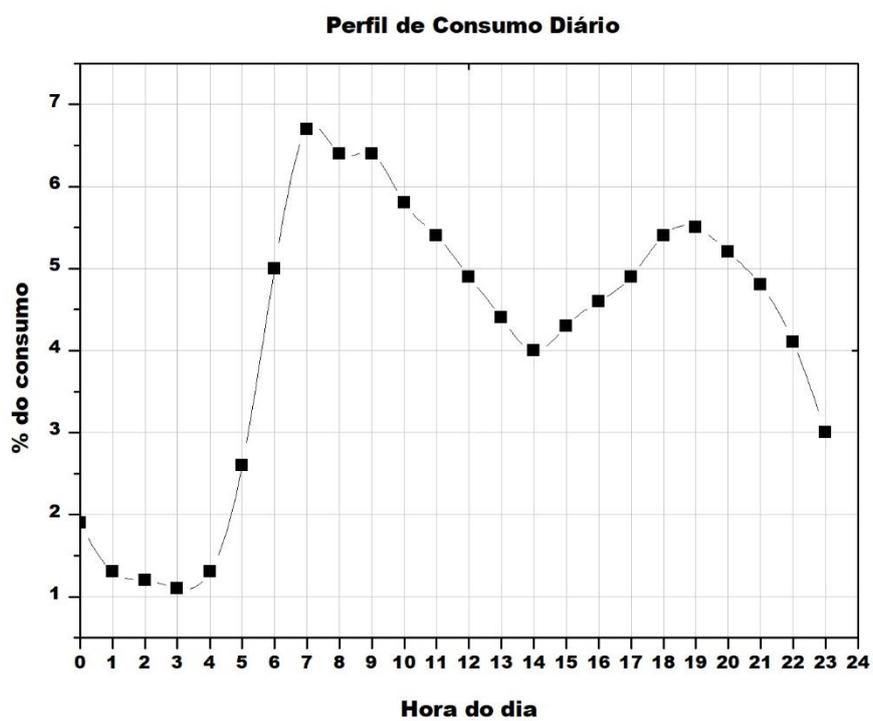
Hora	Consumo (%)	Hora	Consumo(%)
0	1,9	12	4,9
1	1,3	13	4,4
2	1,2	14	4
3	1,1	15	4,3
4	1,3	16	4,6
5	2,6	17	4,9
6	5	18	5,4
7	6,7	19	5,5
8	6,4	20	5,2
9	6,4	21	4,8
10	5,8	22	4,1
11	5,4	23	3

Fonte: (48)

Vale observar que nessa tabela está descrito o perfil horário de consumo e não o valor nominal de consumo.

Para melhor visualização desse perfil, esses números estão representados graficamente na figura 20. Percebe-se de imediato que os picos do consumo ocorrem no início da manhã, quando grande parte das pessoas acordam e usam o banheiro para se prepararem para sair para o trabalho ou escola, e no início da noite, quando as pessoas retornam às casas. Durante a madrugada é quando há menos consumo, já que normalmente é quando as pessoas dormem.

Figura 20: Perfil de Consumo diário



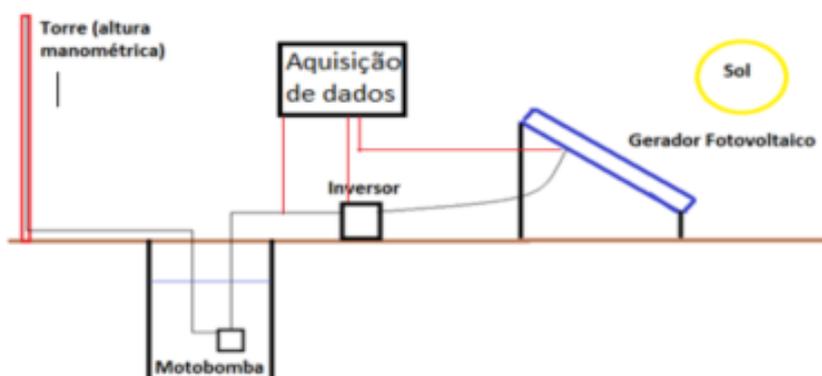
Fonte: Autor

4 METODOLOGIA

4.1 DESCRIÇÃO GERAL DA BANCADA DE TESTE

A bancada de teste para o sistema de bombeamento de água fotovoltaico está localizada em Recife-PE (latitude: 08°03'14" S, longitude 34°52'52" W), possui uma torre com alturas variáveis de (12, 24, 32 e 42 metros). A bancada é flexível, podendo serem instaladas várias configurações de arranjos fotovoltaicos com diferentes tipos de bombas. As figuras 21 e 22 mostram, respectivamente, o desenho esquemático e sua foto real. A bancada de testes possui uma cisterna de 12 m³, que trabalha em circuito fechado, de modo que o nível da água no reservatório se mantém constante durante os testes.

Figura 21: Layout esquemático da Bancada de testes para SBFV



Fonte: Autor

Figura 22: Fotografia da Bancada de Testes de SBFV



Fonte: Autor

4.2 ARRANJO FOTOVOLTAICO

O arranjo FV foi montado com todos os módulos em série, com uma inclinação de 23° em relação à horizontal e alinhados no sentido N-S (azimute zero). Na figura 23 pode ser visto o arranjo; nela constam 17 módulos, mas um deles está desconectado; sendo assim, são utilizados 16 módulos em série, gerando uma potência máxima nominal de 880 Wp e uma tensão de potência máxima nominal de 278,4 Volts. O módulo utilizado é um ISOFOTON I-55 e suas características nominais estão descritas na tabela 3.

Tabela 3: Características nominais do módulo FV utilizado

Potência máxima	$55 \pm 10\%$ Wp
Corrente de Curto circuito	3,38 A
Tensão de Circuito aberto	21,6 V
Corrente de máxima potência	3,16 A
Tensão de máxima potência	17,4 V
Dimensões do módulo	0,34m x 1,3 m

Fonte: fabricante dos painéis

Figura 23: Fotografia do arranjo FV utilizado no experimento



Fonte: Autor

As características nominais do arranjo estão na tabela 4.

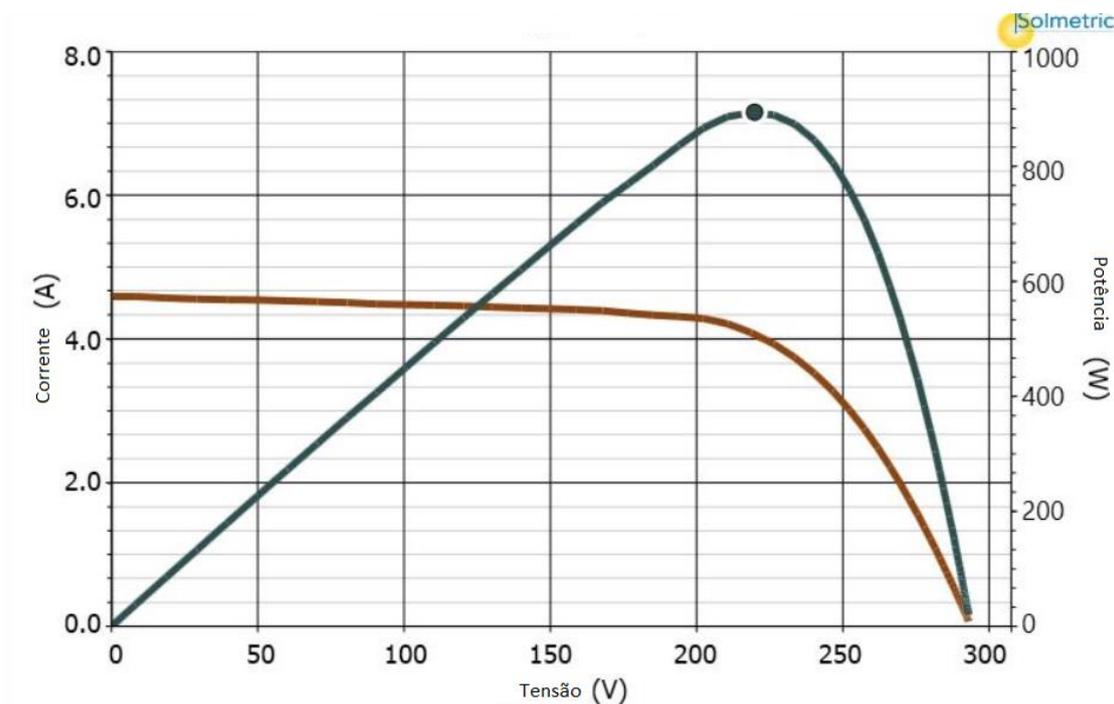
Tabela 4: Características nominais do Arranjo

Potência máxima	894,2 W
Corrente de Curto circuito	4,59 A
Tensão de Circuito aberto	293,7 V
Corrente de máxima potência	4,07 A
Tensão de máxima potência	219,8 V
Dimensões do arranjo	7,072 m ²

Fonte: Fabricante dos painéis

Foi extraída a curva característica do arranjo utilizando um equipamento da Solmetric que varia a carga de 0 a infinito ohms, ao longo de um tempo pequeno; cerca de 2 segundos, em que a irradiação ficou constante, e foram armazenados os valores de tensão e corrente, gerando o gráfico da figura 24. A curva em azul é tensão vs potência e a em marrom é tensão vs corrente. Esse teste foi feito a 970 W/m²; a temperatura dos módulos foi de 55°C.

Figura 24: Curva Característica do Arranjo



Fonte: Autor

4.3 INVERSOR DE FREQUÊNCIA

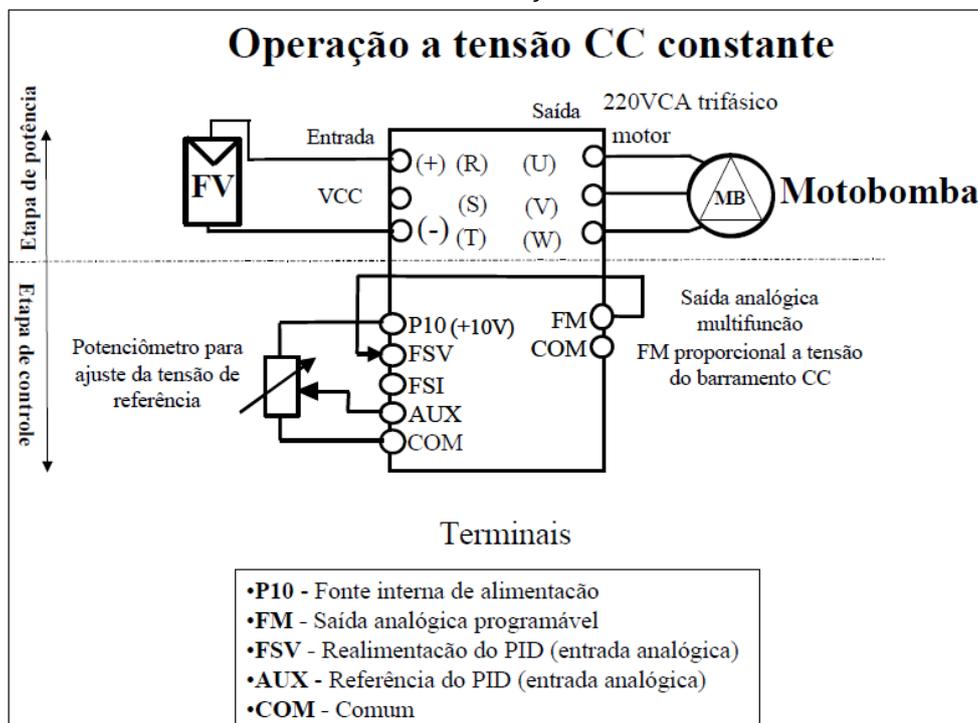
O inversor utilizado é um Siemens Micromaster 420, que não conta com o seguidor de máxima potência e por isso a escolha da tensão de trabalho foi manual. A tensão de trabalho escolhida foi a tensão de máxima potência medida para o arranjo, ou seja, 219,8 V. O inversor possui controlador de velocidade escalar, que é eficiente para as velocidades de rotação do motor da bomba. O controlador proporcional integral (PI) é utilizado para manter a tensão aproximadamente constante na alimentação. O funcionamento do controlador PI ocorre da seguinte maneira:

Ao variar a irradiação sobre o arranjo, a quantidade de energia transferida à bomba varia; então, o controlador PI aumenta ou diminui a velocidade de rotação para manter a tensão de alimentação aproximadamente constante e igual à tensão de máxima potência do arranjo.

O conversor de frequência permite monitorar a tensão de entrada em seu barramento de alimentação, através de um sinal de tensão ou corrente (0-10 V ou 4-20 mA) proveniente de uma saída analógica (FM, figura 25) configurada para responder proporcionalmente ao valor da tensão de entrada. Este sinal é então introduzido em uma entrada de sinal também analógica, e comparada a um valor de referência, determinado pelo usuário, o qual

corresponderá à tensão de operação desejada. O controlador PI atuará então, sobre o erro resultante, variando a velocidade de rotação da motobomba. (28)

Figura 25: Sistema de controle de um conversor de frequência configurado para operar com tensão de alimentação constante



Fonte: Oliveira, 2004 (28)

4.4 CONJUNTO MOTOR BOMBA

O conjunto motor bomba é do tipo submerso; o motor é de 0,75 CV, de indução trifásico, de corrente alternada. A bomba é centrífuga de múltiplos estágios, tem 11 estágios. A tabela 5 contém as informações do fabricante, da bomba e do motor.

Tabela 5: Características do conjunto motor bomba

Motor	380 V Trifásico, 60 Hz, corrente: 1,9 à 2,5 A
Tipo	Múltiplo estágios: 11
Conjunto motor bomba	Eficiência na faixa de vazão do sistema: 10 a 30 %

Fonte: Fabricante do equipamento

4.5 SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS

Neste trabalho foi utilizado um DattaLogger da Campbel CR1000, onde ele lê os valores das variáveis a cada segundo e armazena a média por minuto. O sistema de aquisição possui 8 entradas analógicas diferenciais com capacidade de leituras de 5 volts de tensão por canal. O DattaLogger só consegue ler sinais na forma de tensão, por isso, alguns sensores nos quais a saída é diferente de tensão; devem ser condicionados, figura 26.

Figura 26: Sistema de aquisição de dados



Fonte: Autor

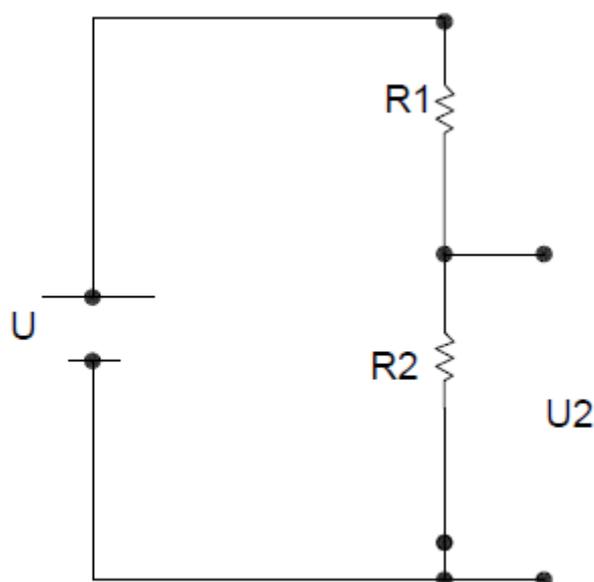
4.5.1 Parâmetros Monitorados

Parâmetros Elétricos

As variáveis elétricas medidas foram: tensão e corrente na saída do arranjo PV.

A tensão é medida com ajuda de um divisor de tensão, pois o sistema de aquisição de dados só possui capacidade de realizar leituras até 5V; por isso, a tensão é dividida proporcionalmente entre os resistores dependendo do valor de suas resistências. O esquema do divisor de tensão é apresentado na figura 27.

Figura 27: Divisor de Tensão



Fonte: Autor

Onde: U é a tensão elétrica na saída do arranjo;

U2 é a tensão no resistor 2, onde é feita a leitura pelo CR1000;

R1 é um resistor de 1 MΩ;

R2 é um resistor de 10 K Ω.

Desse modo, a equação (8) que é usada para converter a leitura do DattaLogger para a tensão experimental do gerador é dada por:

$$U = U_2 \frac{R_1 + R_2}{R_2} \quad (8)$$

A corrente na saída do conjunto gerador é medida com a ajuda de um ACS - 172, que é um sensor ativo que já possui um condicionador de sinal que entrega sua saída em voltagem proporcional à corrente de entrada. A constante de proporcionalidade foi obtida por meio de calibração; esse instrumento possui um erro de 1,5% para suas condições de trabalho.

Com essas medidas em mãos foi possível calcular a potência total gerada pelo conjunto gerador com o auxílio da equação 9.

$$P_g = UI \quad (9)$$

Onde: P_g (Watts) é a potência gerada no arranjo FV;

U(volts), tensão elétrica medida nos terminais do arranjo FV;

I(ampère), corrente elétrica medida nos terminais do arranjo FV.

Parâmetro Solarimétrico

O sensor utilizado para medir a irradiância no plano do módulo FV foi um piranômetro fotovoltaico da LI-COR, modelo LI-200R. Novamente, foi feito o condicionamento do sinal de modo que o conjunto piranômetro e resistor foi calibrado por um piranômetro termoelétrico padrão de classe A, com erro 3 %. A figura 28 mostra o sensor fotovoltaico instalado no plano do arranjo FV.

Figura 28: Piranômetro instalado no SBFV



Fonte: Autor

Com a medida da irradiância coletada (I_{col}) no plano do arranjo foi possível o cálculo da potência elétrica total entregue ao sistema (inversor + bomba) pelo arranjo FV mediante:

$$\eta_g = \frac{\int P_g dt}{A \int I_{col} dt} \quad (10)$$

Onde: η_g é a eficiência do arranjo;

$P_g(watts)$ é a potência gerada no arranjo FV;

A é a área total do arranjo fotovoltaico;

I_{col} é medida em watts por metro quadrado, no plano do arranjo FV.

Outros Parâmetros Meteorológicos

A umidade relativa e temperatura do ar foram medidas pelo sensor HMP 155 do fabricante Vaisala. A umidade relativa foi medida por um capacitor com um material que absorve umidade, geralmente um polímero, entre suas placas. A quantidade de carga elétrica armazenada no capacitor depende diretamente da capacitância, que se altera com a água absorvida; é um sensor de resposta linear. O erro na faixa de trabalho varia de 1 a 1,8%.

O funcionamento do termômetro responsável por medir a temperatura ambiente tem como base a conhecida variação da resistência elétrica que o seu metal base, platina, sofre com a variação da temperatura. A figura 29 ilustra esse sensor.

Figura 29: Sensor de umidade relativa e temperatura ambiente



Fonte: Autor

Os parâmetros de velocidade do vento (metro por segundo) e direção do vento (ângulo em relação a uma direção escolhida), ambos foram medidos pelo sensor 034B-L da Campbell.

O 034B monitora a velocidade do vento usando um anemômetro de três copos que contém um interruptor de lâmina magnética selado. A rotação da roda do copo produz um pulso que é diretamente proporcional à velocidade do vento. A frequência do pulso, que já vem condicionada de fábrica, é medida pelo canal de contagem de impulsos do datalogger, depois convertida para a unidade de velocidade utilizada. Tem um erro de 1,1%. A direção do vento é detectada com um potenciômetro. Com a tensão de excitação de precisão do datalogger aplicada ao elemento do potenciômetro, o sinal de saída que também já foi condicionado de fábrica, é uma tensão analógica que é diretamente proporcional ao azimute da direção do vento. O erro desse instrumento é de 4°. A figura 30 mostra o sensor.

Figura 30: Sensor de direção e velocidade do vento

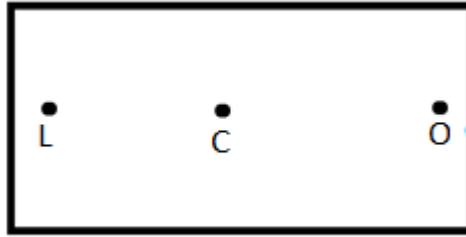


Fonte: Autor

Térmicas do Arranjo PV

As variáveis térmicas medidas no arranjo foram as temperaturas (graus célsius) em 3 pontos do arranjo FV conforme mostrado na figura 31. A leitura foi feita por um sensor LM-35 que possui uma resposta, em volts, proporcional à entrada, de modo que 10mV equivale a 1 °C.

Figura 31: Medidas térmicas do arranjo



Fonte: Autor

Parâmetros Hidráulicos

As variáveis hidráulicas medidas foram: altura manométrica (em metros) e vazão da bomba (metro cúbico por segundo). A vazão foi medida por um sensor eletromagnético instalado na tubulação de recalque da bomba. O sensor é do fabricante Endress Hauser do modelo PROMAG F, muito preciso, sendo o erro da ordem de 0,2%. Nessa condição, praticamente não insere perda de carga na tubulação, pois sua perda de carga é muito semelhante ao de um tubo de mesmo comprimento. O seu princípio de funcionamento baseia-se na condutividade elétrica do fluido; no caso da água, que em movimento induz uma força eletromotriz nos eletrodos do sensor; a força eletromotriz é o sinal de saída do sensor, que é condicionado pelo próprio sensor e entregue ao sistema de aquisição de dados. (Figura 32).

Figura 32: Medidor de vazão eletromagnético



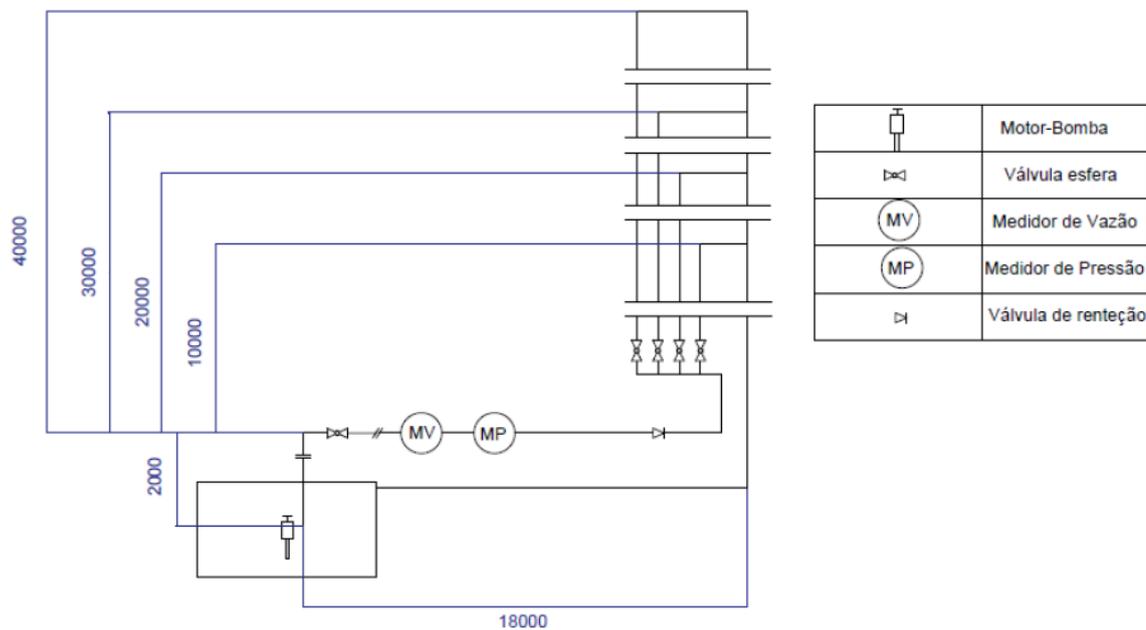
Figura 32 (continuação): Medidor de vazão eletromagnético



Fonte: Autor

A altura manométrica foi medida manualmente; o erro calculado ficou em torno de 3%. O diagrama hidráulico pode ser visto na figura 33. As medidas estão em milímetros. O nível da água da sucção se mantém constante, uma vez que o bombeamento é feito em um circuito fechado.

Figura 33: Diagrama Hidráulico da Bancada de testes de SBFV



Fonte: Autor

Com essas duas medidas (vazão e altura manométrica) pode-se calcular a potência entregue ao fluido pelo sistema. A potência hidráulica é dada pela equação:

$$P_h = \rho * g * h * Q \quad (11)$$

onde: P_h é a Potência hidráulica entregue ao fluido (watts);

ρ = massa específica da água (1000 quilogramas por metro cúbico);

g = aceleração da gravidade (metros por segundo ao quadrado);

h = altura manométrica (metros),

Q = Vazão de água (metro cúbicos por segundo);

Eficiência total e parcial do SBFV

A eficiência do SBFV pode ser descrita como:

$$\eta_{Sis} = \frac{\int P_h dt}{A \int I_{col} dt} \quad (12)$$

onde: η_{sis} = eficiência do SBFV;

P_h é a Potência hidráulica entregue ao fluido (watts);

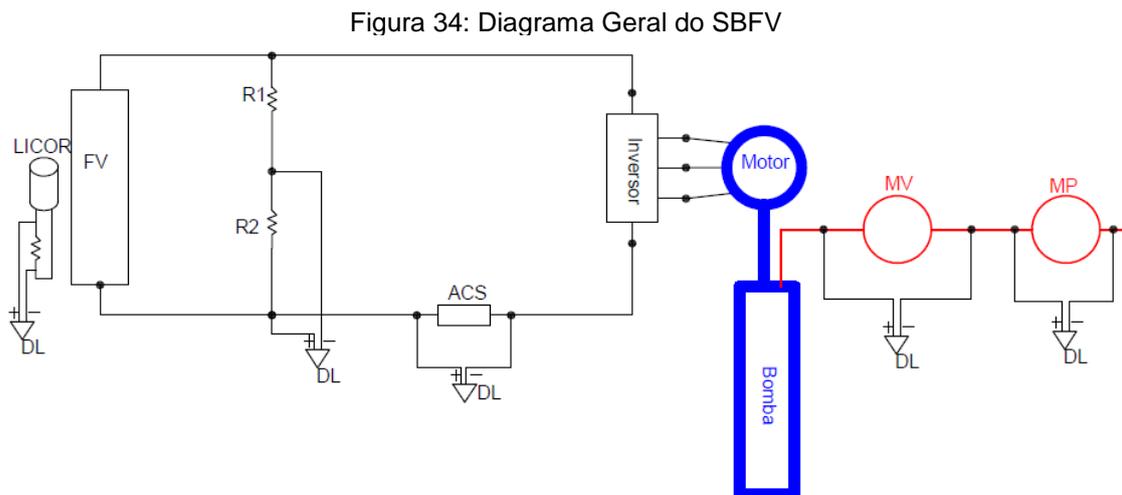
A é a Área total do arranjo fotovoltaico;

I_{col} é a medida da irradiação solar (W/m^2) no plano do arranjo FV.

Da mesma forma, a eficiência do conjunto bomba+ inversor pode ser expressa por:

$$\eta_{conj} = \frac{\int P_h dt}{\int P_g dt} \quad (13)$$

A figura 34 esquematiza os circuitos elétrico; mecânico e hidráulico do SBFV de forma a permitir facilmente a definir as eficiências parciais.



Fonte: Autor

Onde: FV- Gerador Fotovoltaico

DL- Datalogger

R1 e R2 – Resistores do divisor de tensão

ACS- Medidor de corrente

MV- Medidor de vazão

MP- medidor de pressão

Circuito preto - circuito elétrico

Circuito azul – Circuito mecânico

Circuito vermelho- Circuito hidráulico

4.6 INDICADORES ESTATÍSTICOS

Os seguintes indicadores estatísticos serão utilizados:

Desvio percentual – (DP)

$$DP = 100 \frac{\sum n(V_{calculado} - V_{medido})}{\sum n V_{medido}} \quad (14)$$

Erro médio quadrático normalizado – (EMQN)

$$EMQN = 100 * \sqrt{\frac{\frac{\sum n(V_{calculado} - V_{medido})^2}{n}}{V_{médio}}} \quad (15)$$

Onde V significa a grandeza estimada ou medida e N o número de medidas.

4.7 ANÁLISE ECONÔMICA

Para a análise econômica foi utilizado o custo nivelado do bombeamento de água, que pode ser visto na eq. 16.

$$CNAB = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{I_t + M_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{E_t}{(1+r)^t}} \quad (16)$$

CNA = Custo nivelado da água bombeada

I_t = investimento no ano t, em R\$

M_t = Custo de operação e manutenção em R\$

E_t = água bombeada no ano t

r= Taxa de juros em % por ano

n= Vida útil do sistema de bombeamento FV+ armazenamento

4.8 CAMPANHA DE MEDIÇÃO

A campanha de medição para a determinação experimental da curva característica do SBFV foi realizada entre os meses de setembro à primeira quinzena de novembro de 2017, totalizando 10 semanas. O período diário de medição foi no horário das 7:00 às 16:00, que coincidiu com uma janela de tempo sem a ocorrência de sombreamento do arranjo FV. Nesse período o sistema de aquisição de dados armazenou a média de 60 leituras por minuto de irradiação, tensão e corrente de saída do gerador, velocidade e direção do vento, umidade e temperatura do ar, temperatura de três pontos do arranjo e o volume bombeado. Em campanhas distintas as alturas manométricas foram alteradas respectivamente para 12, 24, 32 e 42 metros.

4.9 MODELAGEM POLINOMIAL

As informações experimentais obtidas na campanha de medição foram modeladas mediante uma regressão polinomial com o seguinte formato:

$$Q(I_{cool}, h) = a(h) * I_{coll}^2 + b(h) * I_{coll} + c(h) \quad (17)$$

Onde: Q= vazão l/s

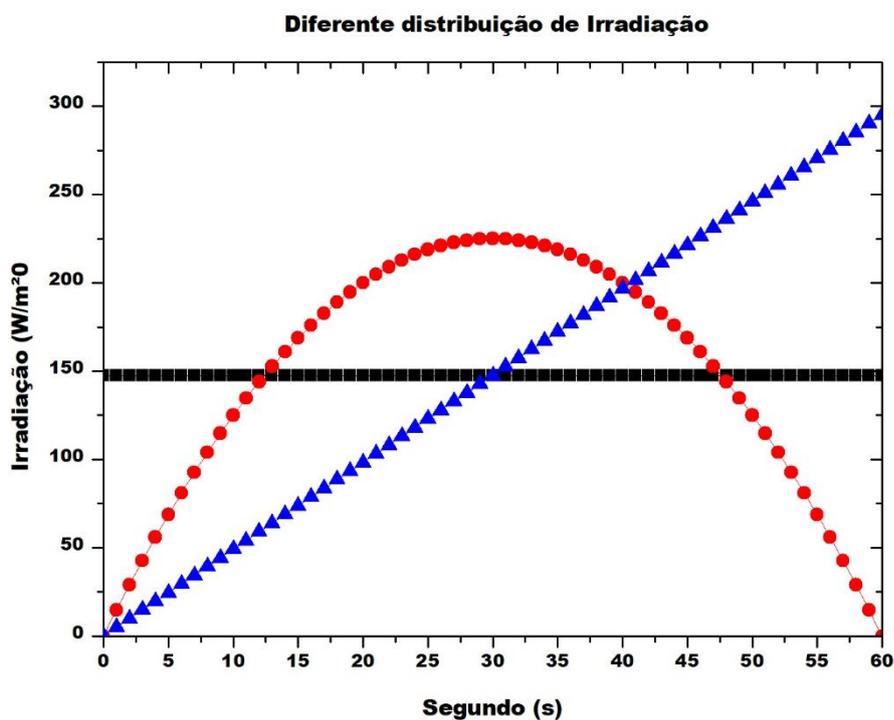
I_{cool} = irradiação solar incidente no plano do arranjo fotovoltaico

h = altura manométrica de bombeamento

a, b e c são os coeficientes da equação de modelagem.

Espera-se que essa modelagem tenha um certo grau de dispersão graças ao fato de tomar explicitamente apenas a irradiação crítica, esse efeito está ilustrado na figura 35:

Figura 35: Diferentes distribuições de irradiação



Fonte: Autor

Na figura acima é possível notar três diferentes situações de distribuição da irradiação, que teriam a mesma média de $150 W/m^2$. Então em um SBFV com irradiação crítica de $150 W/m^2$, vai haver diferentes comportamentos dependendo da distribuição.

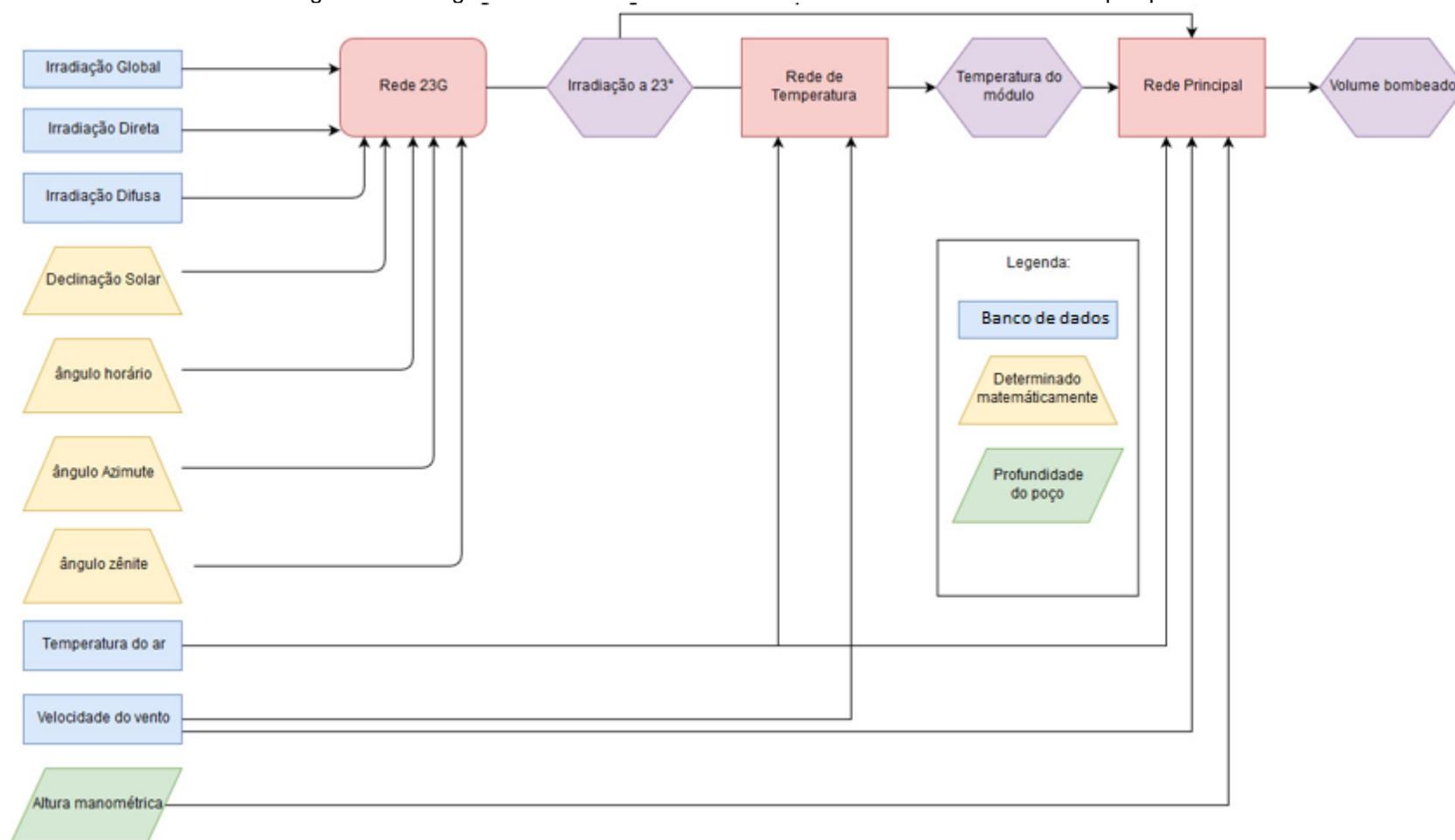
No caso da curva constante de irradiação igual a $150 W/m^2$, não haverá nenhuma água bombeada; na curva de irradiação linear, após 30 segundos, haverá bombeamento e finalmente na curva de irradiação parábola invertida haverá bombeamento entre 10 a 50 segundos. A curva linear terá um total de $8850 J/m^2$ de energia acima da irradiação crítica; a curva parabólica possui aproximadamente $6980 J/m^2$ de energia acima da irradiação crítica e a reta constante zero. Essas diferenças explicam o aumento da dispersão.

4.10 MODELAGEM EM RNA DO SBFV

A modelagem polinomial não explicita a dependência do volume bombeado com outras variáveis meteorológicas como temperatura do ar e velocidade do vento. Outro aspecto é que só poderá ser aplicado em alturas manométricas em que foram feitos os testes experimentais. Então, para simulações de funcionamento em diferentes localidades com condições climatológicas, geométricas diversas (alturas manométricas genéricas), é necessário aperfeiçoar essa modelagem. Para isso foi utilizada uma modelagem com rede neural artificial.

A figura 36 resume toda a modelagem que será discutida posteriormente.

Figura 36 Fluxograma Geral do Processo de Previsão do volume em um local qualquer

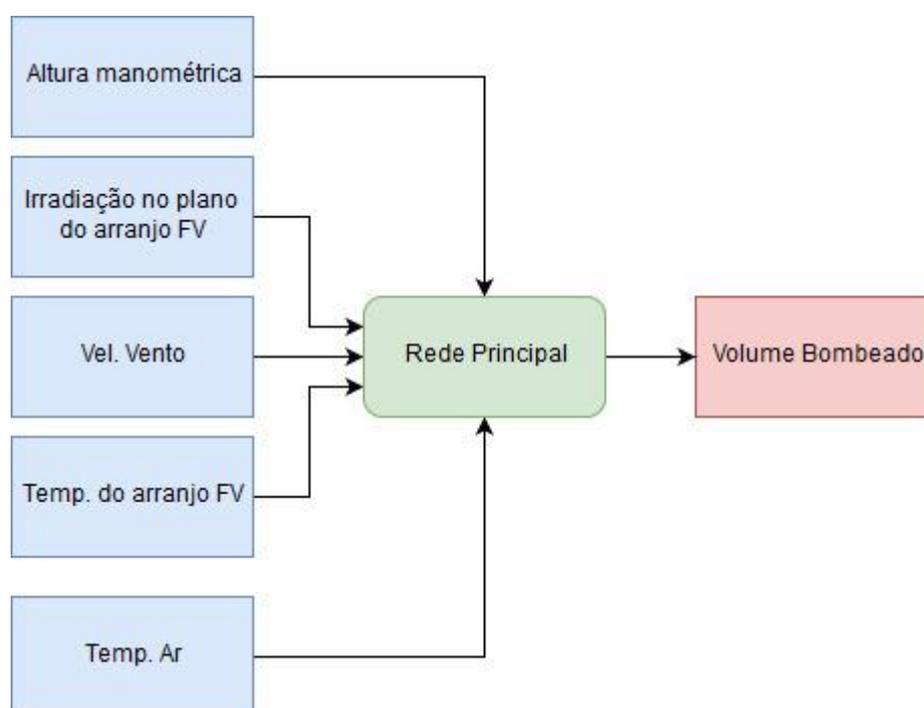


Fonte: Autor

Com os dados experimentais da campanha de medição anteriormente citado, a rede neural, chamada a partir de agora de Rede Principal, foi treinada, validada e verificada com os seguintes dados de entrada: irradiação solar no plano do arranjo, temperatura do ar e dos módulos, velocidade do vento, altura manométrica e como saída a vazão da bomba.

A Rede Principal, possui 10 camadas, sem realimentação; foi treinada para inferir o volume bombeado para qualquer altura da bancada de testes, fig. 37. Os dados para todas as alturas que foram obtidos na bancada de teste foram aleatoriamente divididos em três grupos: o primeiro foi o grupo de treino que continha 50% de todos os dados; o segundo foi o grupo de validação que continha 25% de todos os dados; e por último, o grupo de teste que continha os 25% restantes dos dados. Esse mesmo método de treinamento e validação foi estendido às demais redes utilizadas

Figura 37: Fluxograma da Rede Neural Artificial – Principal



Fonte: Autor

Uma vez a Rede Principal pronta é possível fazer previsões sobre o comportamento desse SBFV para qualquer região em que se disponha os dados meteorológicos locais e para todas as alturas manométricas compreendidas de 12 a 42 metros, porém, para que a simulação de um SBFV possa ser generalizada a locais com condições climáticas diversas, a modelagem anteriormente realizada precisa ser estendida em dois aspectos:

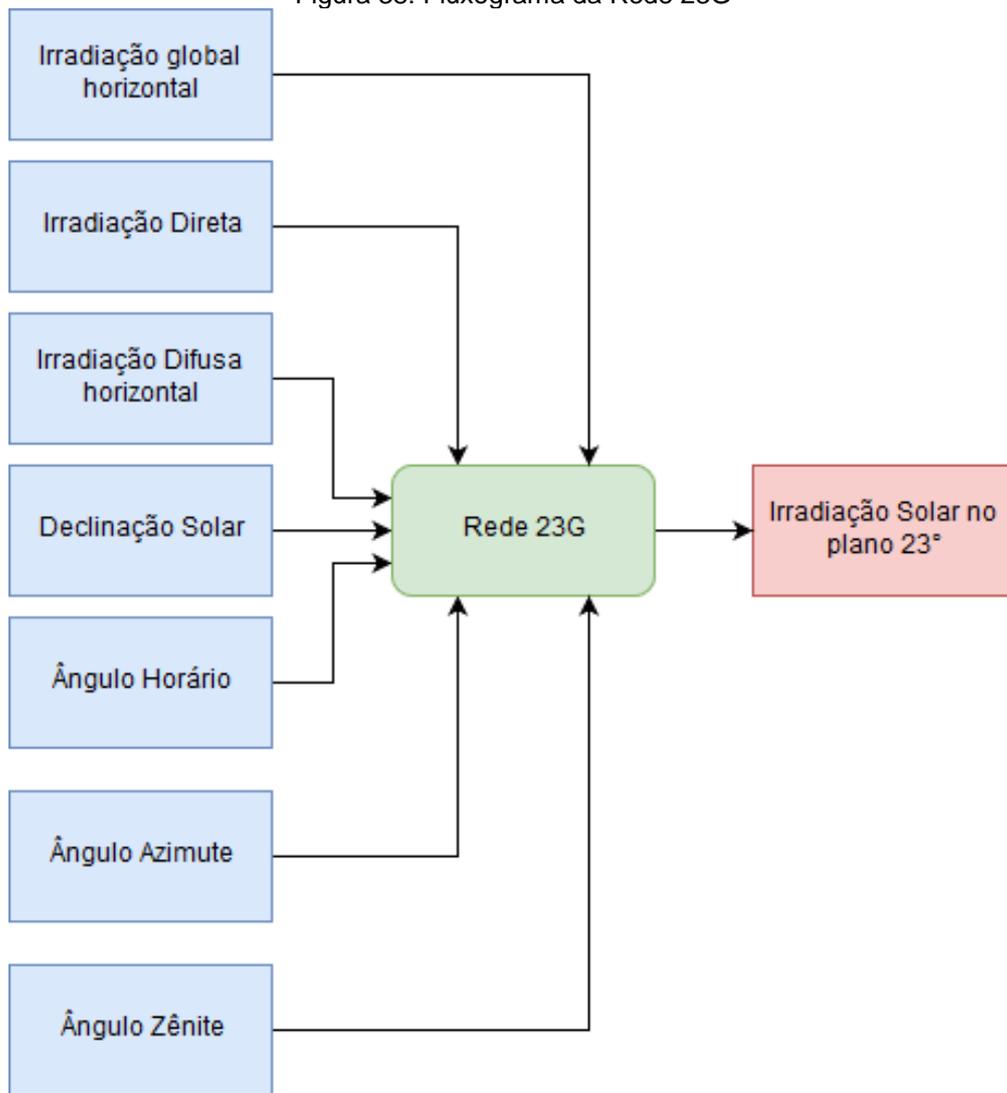
- Dados os parâmetros meteorológicos locais, como calcular (modelar) a irradiação solar incidente no plano coletor
- Como calcular (modelar) a temperatura operacional do arranjo FV.

Para calcular a irradiação solar incidente no plano coletor por questão de custo-benefício, foi tentado inicialmente o método desenvolvido por Olmo (46), que requer somente a irradiação solar horizontal e albedo local; os outros fatores são todos calculados. Uma outra metodologia foi desenvolvida utilizando uma RNA para estimar a irradiação solar para um plano com azimute zero e uma inclinação em relação à horizontal de 23° . Para simplificar, a referência foi denominada Rede 23G.

A Rede 23G contém a limitação de só conseguir calcular a irradiação no plano de 23° , pois foi só com o ângulo que foi possível treinar, devido à limitação do banco de dados usado para o treinamento. A biblioteca de medidas do grupo FAE, que apesar de possuir vários anos de medidas, só possuía, como dito anteriormente, medidas de irradiação global no plano de 23° . Mesmo com essa limitação, ainda atende a uma grande faixa de locais onde ela pode ser efetivamente utilizada. Na medida em que dados forem sendo acumulados ou experiências forem planejadas para medidas em ângulos discretos de 10° em 10° por pelo menos 03 anos, a aplicação do método é muito simples e pode ser utilizado para ângulos intermediários aos medidos.

A figura 38 mostra quais variáveis foram utilizadas para a construção da rede 23G:

Figura 38: Fluxograma da Rede 23G



Fonte: Autor

As entradas determinísticas são:

$$\text{Declinação solar:} \quad \delta = 23,45 * \text{sen}\left(\frac{360}{365} * (284 + N)\right) \quad (18)$$

$$\text{Ângulo horário: } h = \pm 0,25 \text{ (minutos para meio dia solar)} \text{ ou } h = (HSA - 12) * 15 \quad (19)$$

$$\text{Altitude solar:} \quad \cos(\varphi) = \text{sen}(L)\text{sen}(\delta) + \cos(L)\cos(\delta)\cos(h) \quad (20)$$

$$\text{Azimute solar:} \quad \text{sen}(z) = \frac{\cos(\delta)\text{sen}(h)}{\cos(\alpha)} \quad (21)$$

Ângulo de incidência:

$$\begin{aligned} \cos(\theta) = & \text{sen}(L)\text{sen}(\delta) \cos(\beta) - \cos(L) \text{sen}(\delta)\text{sen}(\beta) \cos(Z_s) + \\ & \cos(L) \cos(\delta) \cos(h) \cos(\beta) + \text{sen}(L) \cos(\delta) \text{sen}(\beta) \cos(Z_s) + \\ & \cos(\delta) \text{sen}(h)\text{sen}(\beta)\text{sen}(Z_s) \end{aligned} \quad (22)$$

Irradiação extraterrestre: $G = G_{SC} \left(1 + 0,033 \cos \frac{360N}{365} \right)$ (23)

Onde: N= dia juliano

h= ângulo horário

HSA= horário solar aparente

L = latitude local.

α = Altitude solar

φ = Zênite

δ =Declinação

z= ângulo Azimute

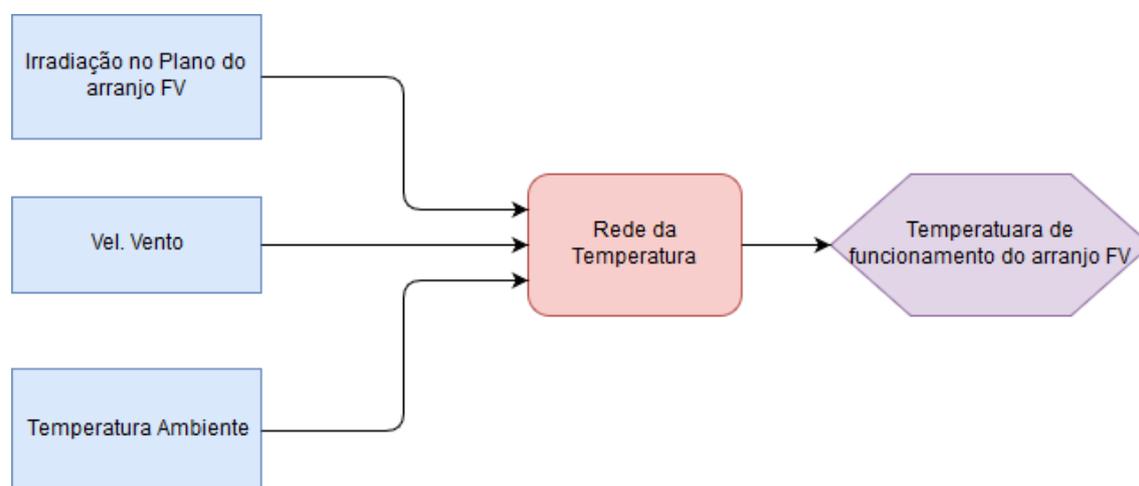
G_{SC} = é a constante solar que vale 1366,1 W/m².

β = ângulo de inclinação da superfície em relação á horizontal

Z_s =azimute da superfície, é o ângulo entre a normal da superfície e o sul verdadeiro

O outro aspecto é a estimativa da temperatura operacional do arranjo FV. Uma das alternativas foi a utilização da correlação de E.Skoplaki et al.(37), que requer para seu cálculo a irradiação no plano dos painéis FV, a temperatura do ar e a direção do vento, conforme já relatado na equação 2. A outra foi a utilização de uma rede neural para estimar a temperatura de funcionamento dos módulos; para simplificar a sua referência, essa terceira rede foi batizada de Rede de modelagem da Temperatura. O banco de dados utilizado para a sua construção foi o mesmo que foi utilizado na Rede principal, mudando apenas as entradas e a saída. A figura 39 abaixo ilustra a Rede da Temperatura.

Figura 39: Fluxograma da Rede da Temperatura



Fonte: Autor

A estimativa para qualquer localidade começa pela rede 23G, as entradas serão as variáveis climáticas de irradiação global, direta e difusa, além das variáveis determinísticas de geometria solar calculadas pela equação 18 à 21.

A saída da Rede 23G é utilizada como entrada juntamente com a temperatura ambiente e velocidade do vento na Rede de Temperatura para o cálculo da temperatura de funcionamento dos módulos.

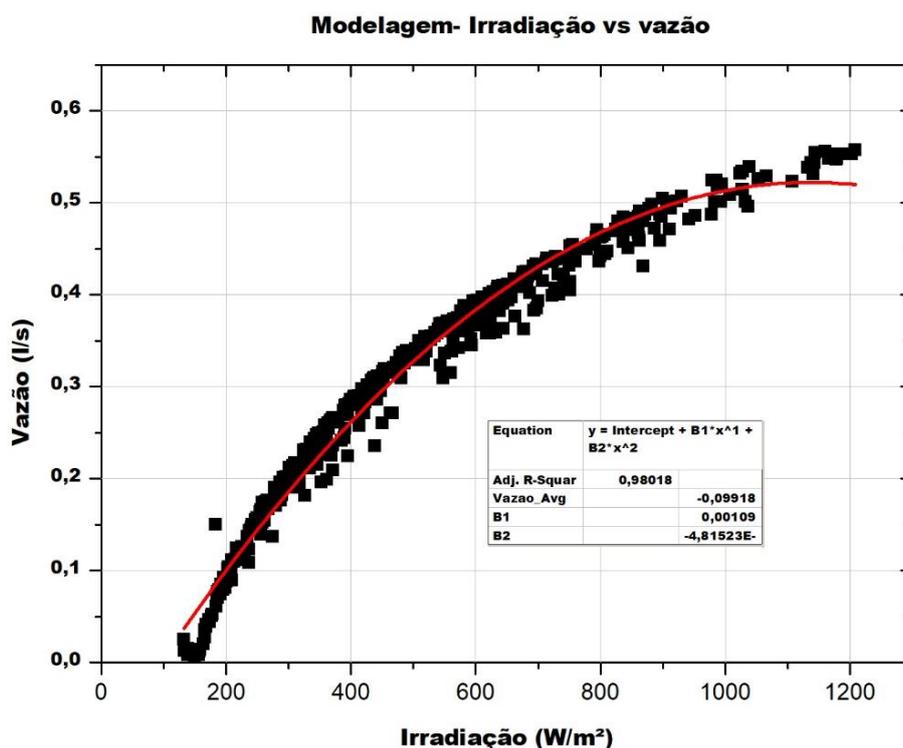
Por fim, tanto a saída da Rede 23G quanto da Rede da Temperatura são utilizadas como entrada na Rede Principal para enfim estimar o bombeamento.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 DETERMINAÇÃO ESPERIMENTAL DA CURVA CARACTERÍSTICA DO SBFV

Um exemplo de modelagem polinomial para um dado dia a 24 metros pode ser visto na figura 40. Cabe ressaltar, que apesar de não estar explícito na equação, os fatores a, b e c, além de dependerem da altura manométrica, também dependem das características do próprio SBFV, como do tipo e montagem do arranjo FV, ou do tipo de acoplamento de carga, além de variáveis meteorológicas como velocidade do vento ou temperatura ambiente. Apesar dessa modelagem ser simples, ela tem uma boa acurácia, além de permitir tirar conclusões importantes (figura 40).

Figura 40: Modelagem Irradiação vs vazão

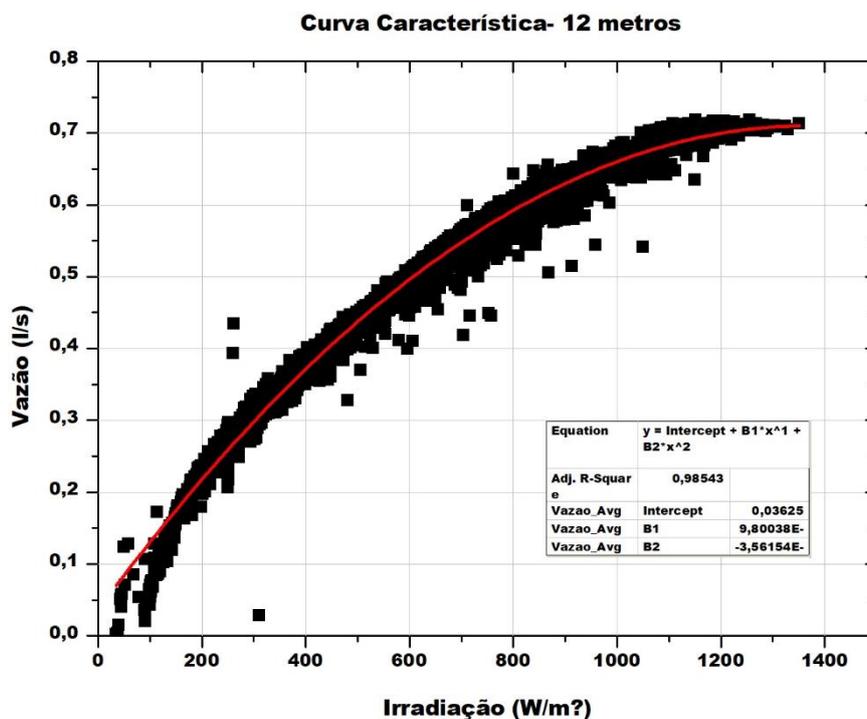


Fonte: Autor

Pela análise do gráfico é possível verificar que o ponto de irradiação crítica, nesse caso, foi igual a 150 W/m². É possível também observar que há uma certa dispersão, que é causada basicamente por dois motivos: a temperatura do gerador FV e a intermitência solar.

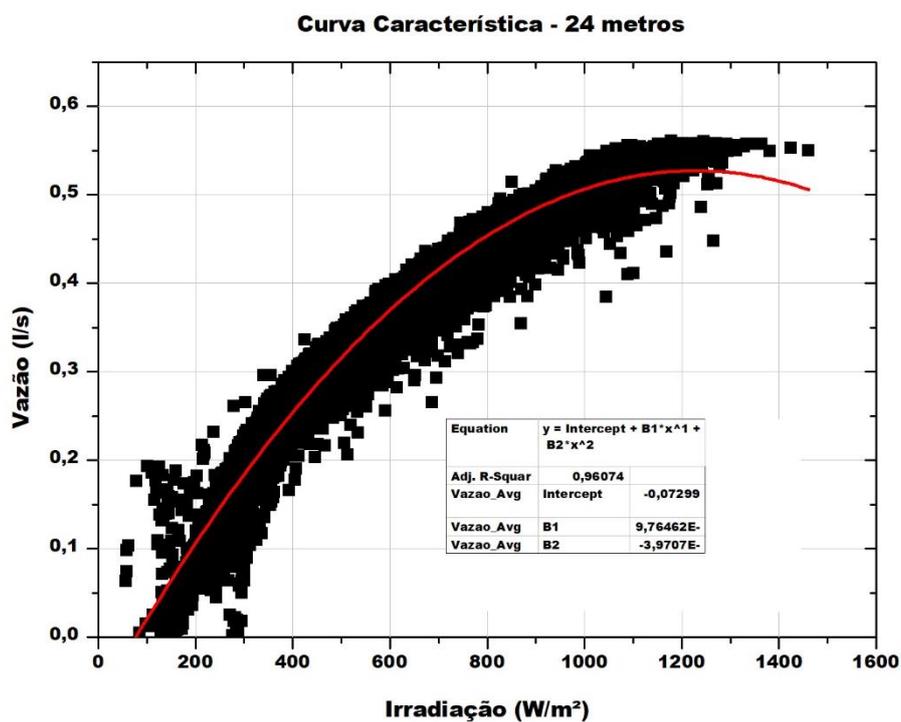
A modelagem polinomial foi obtida para cada altura individualmente, tendo em vista que para cada altura os parâmetros a, b e c da equação 17 são diferentes. As figuras 41, 42, 43 e 44 ilustram todas as modelagens polinomiais feitas.

Figura 41: Curva Característica 12 metros vs experimental



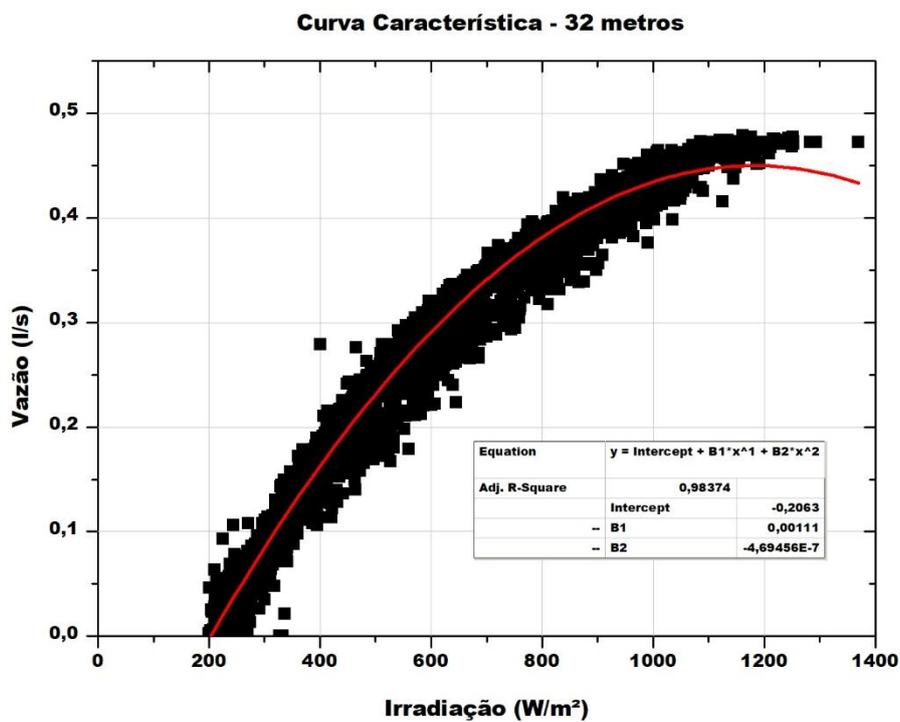
Fonte: Autor

Figura 42: Curva Característica 24 metros vs experimental



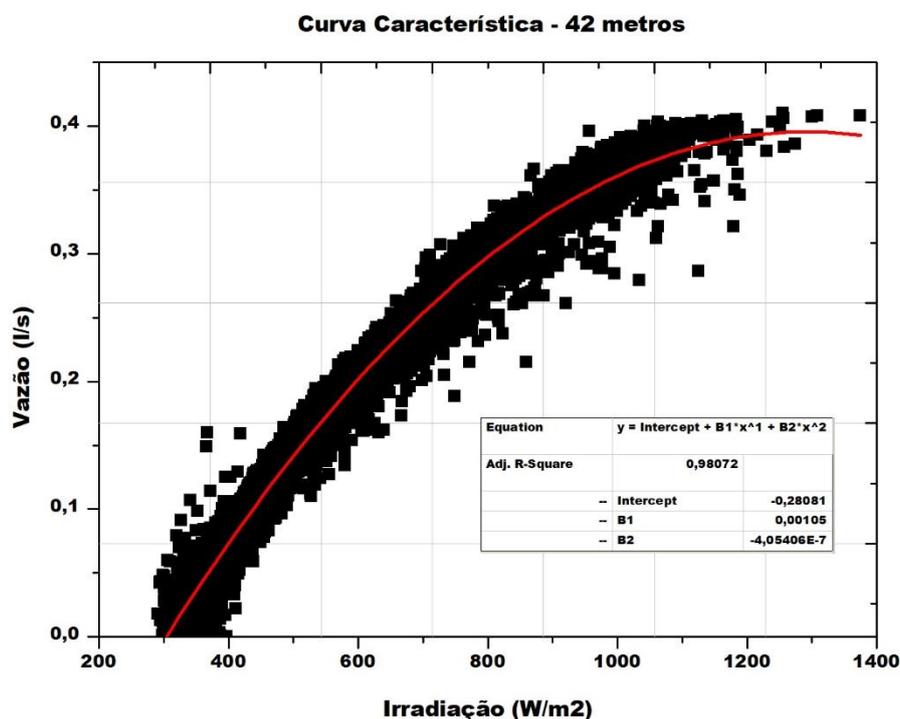
Fonte: Autor

Figura 43: Curva Característica 32 metros vs experimental



Fonte: Autor

Figura 44: Curva Característica 42 metros vs experimental



Fonte: Autor

Pode-se perceber que a irradiação crítica aumenta sempre que aumenta a altura, o que é natural pois uma maior altura implica na necessidade de mais energia para vencer a carga e pelo mesmo motivo o volume bombeado também diminui com o aumento da altura. A dispersão também aumenta, pois como a irradiação crítica aumenta, existem mais episódios em que a irradiação cai abaixo dela.

Como exposto anteriormente, apesar de simples, a modelagem alcança um nível razoável de precisão; a tabela 6 mostra os indicadores estatísticos no item 4.6.

Tabela 6: Resultado da Modelagem polinomial

	DP (%)	EMQN (%)
12 metros	-1,73	5,1
24 metros	3,74	9,1
32 metros	-7,48	11,3
42 metros	-13,63	15,2

Fonte: Autor

A eficiência global, do arranjo e do conjunto motor+bomba+inversor, calculada pelas equações 10, 12 e 13 respectivamente pode ser vista na tabela 7:

Tabela 7: Eficiência do SBFV

	Eficiência global (%)	Eficiência do Arranjo (%)	Eficiência do conjunto motor+bomba+inversor (%)
12 metros	1,2	9,4	13,6
24 metros	1,7	9,4	18,5
32 metros	1,8	8,6	21,1
42 metros	1,9	7,6	25,0

Fonte: Autor

A eficiência do conjunto motor+bomba+inversor varia em conformidade com a otimização do projeto da bomba que foi construída para funcionar otimamente em alturas manométricas da ordem de 50 metros.

5.2 MODELAGEM RNA DO SBFV

Diferente da modelagem polinomial, a modelagem em RNA pode ser treinada com todas as alturas ao mesmo tempo. Os indicadores estatísticos, do item 4.6, da estimativa em RNA global (para todas as alturas) podem ser vistos na tabela 8.

Tabela 8: Resultado da Modelagem em RNA do SBFV

DP (%)	EMQN (%)
-0,6	6,85

Fonte: Autor

O resultado foi melhor que a modelagem polinomial para qualquer altura, uma vez que o DP da modelagem polinomial mais bem-sucedida (12 metros) foi de -1,73% e foi maior do que o DP da modelagem em RNA, apesar de o EMQN da modelagem polinomial para 12 metros (5,1%) foi menor do que o da modelagem em RNA.

Quando o resultado da rede é separado por alturas, têm-se os resultados da tabela 9 (item 4.6):

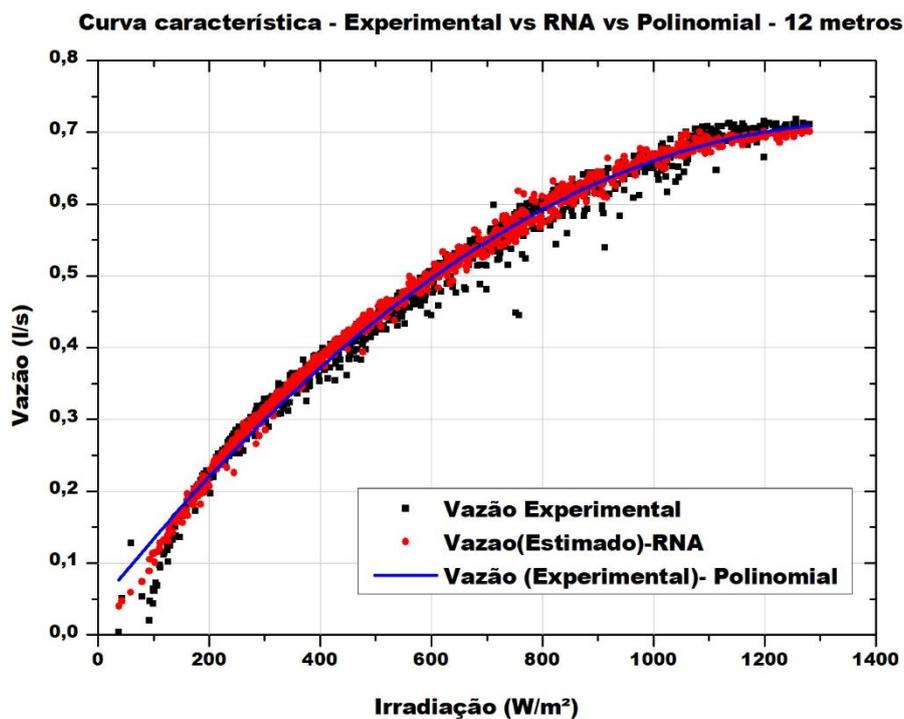
Tabela 9: Resultado da Modelagem por Altura

Altura (metros)	DP (%)	EMQN (%)
12	-0,57	5,10
24	-0,32	8,39
32	-1,09	6,16
42	-0,77	7,58

Fonte: Autor

As figuras 45, 46, 47 e 48 ilustram a comparação dos dois tipos de modelagens, comparados com as medições experimentais.

Figura 45: RNA vs Polinomial 12 metros



Fonte: Autor

Figura 46: Curva Característica- RNA vs Polinomial 24 metros

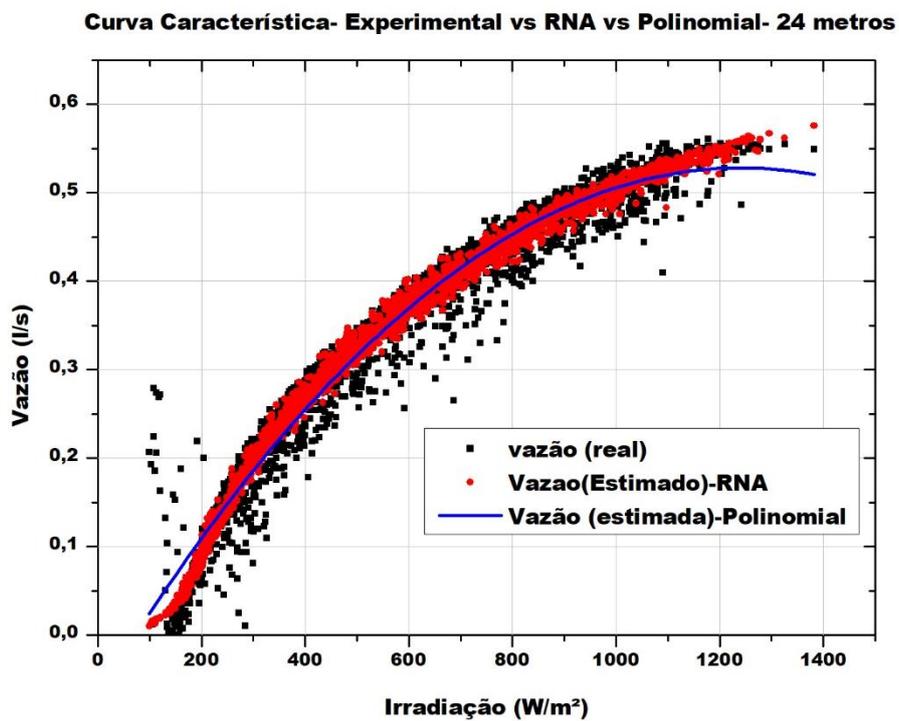


Figura 47: Curva Característica- RNA vs Polinomial 32 metros

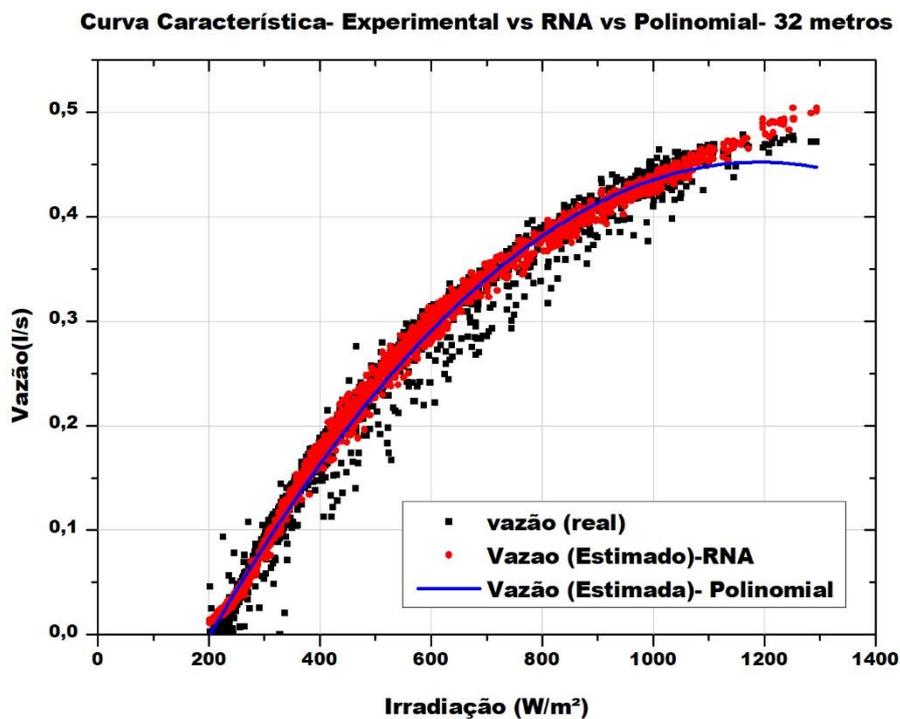
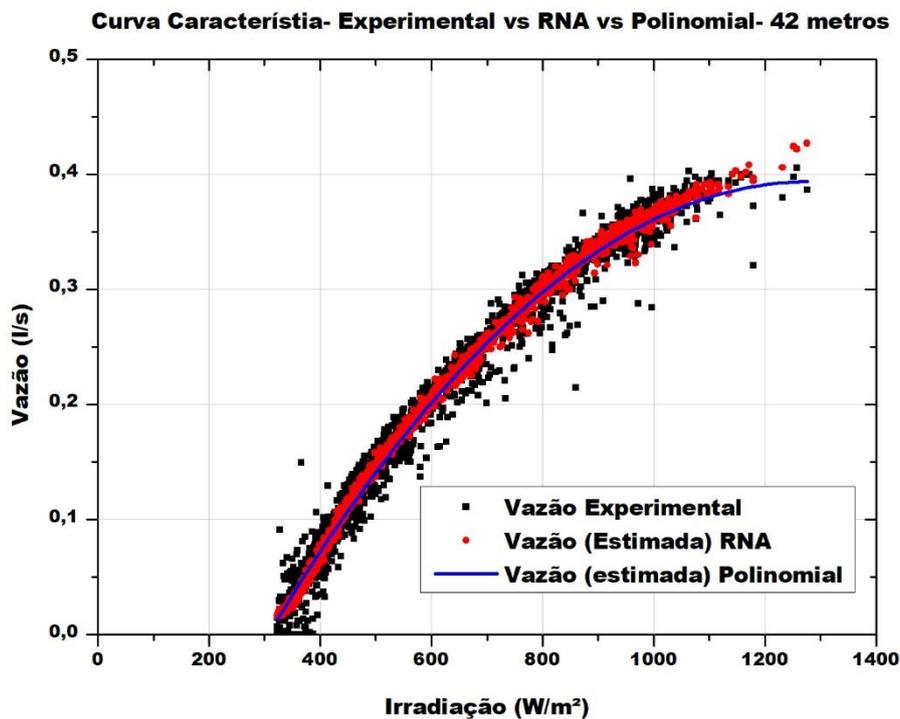


Figura 48: Curva característica- RNA vs Polinomial 42 metros



Fonte: Autor

Tendo em vista os indicadores estatísticos da tabela 9 e à flexibilidade da modelagem em RNA, pode-se extrapolar com confiança os valores para as alturas intermediárias.

5.3 MODELAGEM DO SBFV PARA CONDIÇÕES CLIMÁTICAS DIVERSAS

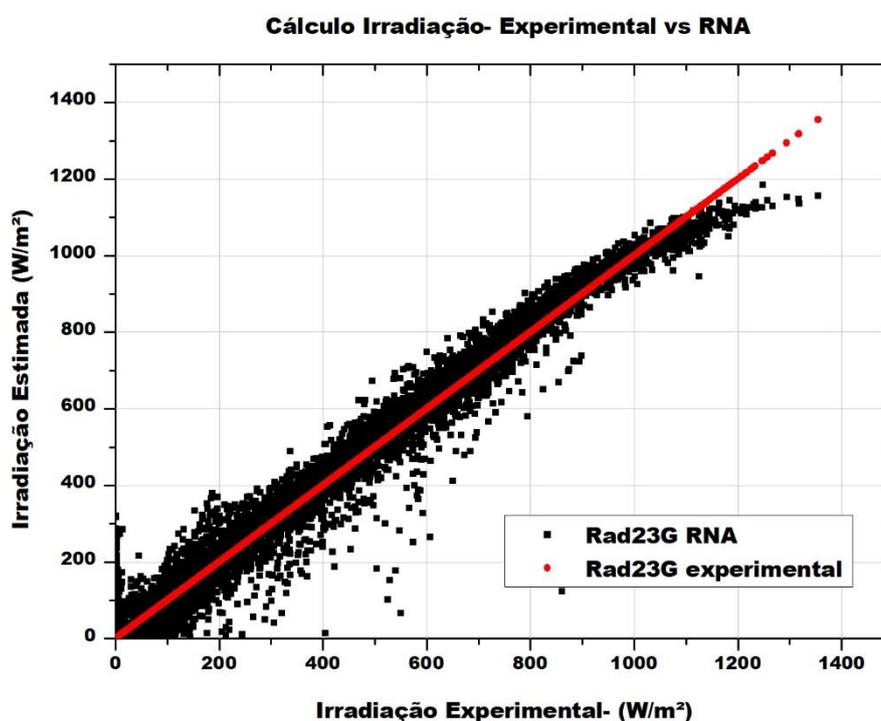
A Rede 23 G foi utilizada para o cálculo da irradiação no plano inclinado; os resultados dos indicadores estatísticos (item 4.6) usados estão apresentados na tabela 10. A figura 49 mostra a comparação entre os dados experimentais, o cálculo pela RNA e a correlação de Olmo et. al. Todos foram implementados utilizando o mesmo banco de dados (Dados do grupo FAE).

Tabela 10: Rede 23G vs Correlação de Olmo et al.

	DP (%)	EMQN (%)
Rede 23 G	-2,95	7,95
Correlação Olmo et al.	8,91	37,77

Fonte: Autor

Figura 49: Cálculo da Irradiação- Experimental vs RNA



Fonte: Autor

A reta vermelha é apenas a irradiação experimental plotada em função dela mesma, ou seja, é uma reta inclinada a 45°. Como pode ser visto nos dois indicadores estatísticos, os resultados estão melhores na Rede 23G do que na correlação de Olmo; sendo assim, para todas as seguintes aplicações onde seja necessário a irradiação no plano inclinado, foi utilizado o resultado da Rede 23G.

5.4 MODELAGEM DA TEMPERATURA DO ARRANJO FV

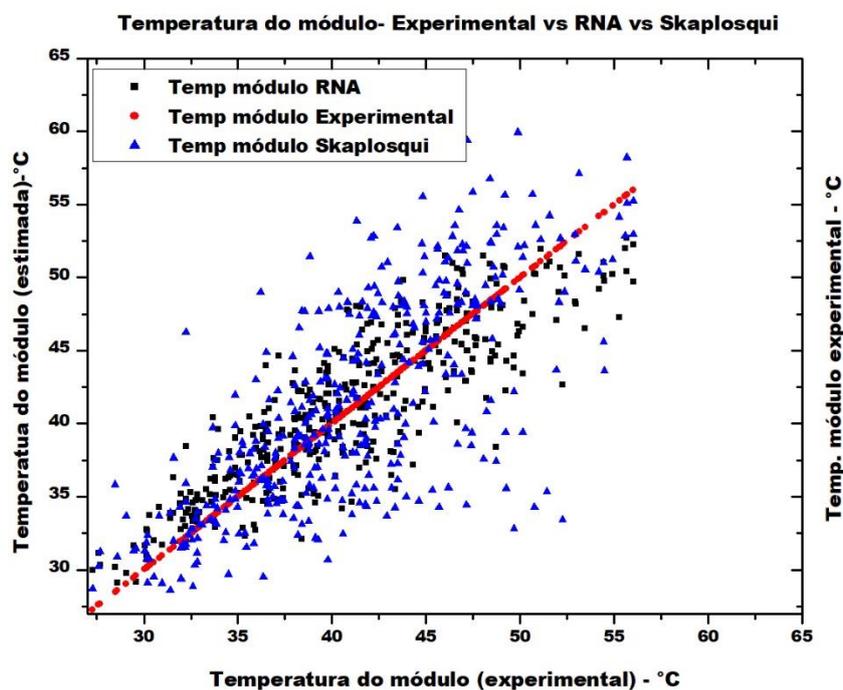
De forma similar ao t3pico anterior, a Rede das temperaturas tamb3m foi confrontada com uma correla33o; nesse caso foi a correla33o de Skoplaqui, da equa33o 2, para assim decidir qual m3todo 3 melhor. Os indicadores estat3sticos (item 4.6) para ambos os m3todos est3o apresentados na tabela 11 e na figura 50.

Tabela 11: Rede da Temperatura vs Correla33o de E. Skoplaqui et al.

	DP (%)	EMQN (%)
Rede das Temperaturas	-0,42	8,90
Correla33o de E. Skoplaqui et al.	-0,38	9,73

Fonte: Autor

Figura 50: Compara33o do c3lculo da temperatura: RNA Vs Skoplasqui



Fonte: Autor

Na figura acima a reta inclinada em 45 graus 3 o alvo para as modelagens, pois ela 3 formada pelos valores experimentais tanto na abcissa quanto na ordenada;

pode-se perceber que a dispersão da correlação de Skaploski é mais dispersa que a RNA.

Nesse caso em particular houve resultados muito próximos para ambos os métodos, de modo que, é praticamente indiferente qual o método escolhido para realizar as previsões, mas nesse trabalho foi escolhido a rede neural pois o indicador RMSE pode ser considerado mais importante.

5.5 INFERÊNCIA DO DESEMPENHO DO SBFV PARA CONDIÇÕES CLIMÁTICAS DIVERSAS

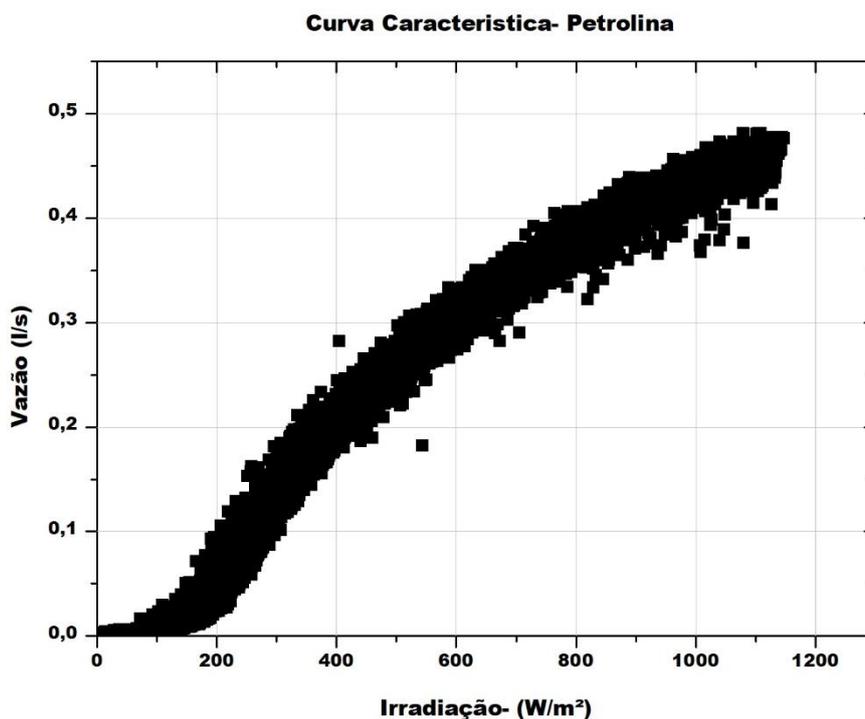
Os dados do banco de dados do SONDA foram utilizados na metodologia descrita na figura 36 e então foi estimado o funcionamento do SBFV para Petrolina.

Por fim, depois de calculado o volume, só resta o dimensionamento do tanque de armazenamento, e para isso se utilizam as equações 4 e 7 e a tabela 2 de demanda. E então, é dimensionado o tanque pelo critério de probabilidade de perda de abastecimento.

5.6 ESTIMATIVA DO COMPORTAMENTO DO SBFV EM PETROLINA

Utilizou-se a metodologia descrita nos itens 4.10 para 5 anos diferentes e os resultados da simulação estão ilustrados na figura 51:

Figura 51: Comportamento do SBFV em Petrolina, altura manométrica 24 m



A irradiação crítica para essa altura de 24 metros foi aproximadamente 114 W/m^2 , que é menor do que a irradiação de 150 W/m^2 para 24 metros do experimento em Recife. Porém, houve também um decréscimo do volume bombeado em relação a Recife, o que foi completamente inesperado já que a irradiação solar em Petrolina se supõe superior a de Recife. Investigando esse problema, foi feito uma comparação da irradiação solar nas duas localidades. As figuras 52 e 53 a seguir ilustram essa comparação.

Figura 52: Comparação do Recurso Solar no mês de abril

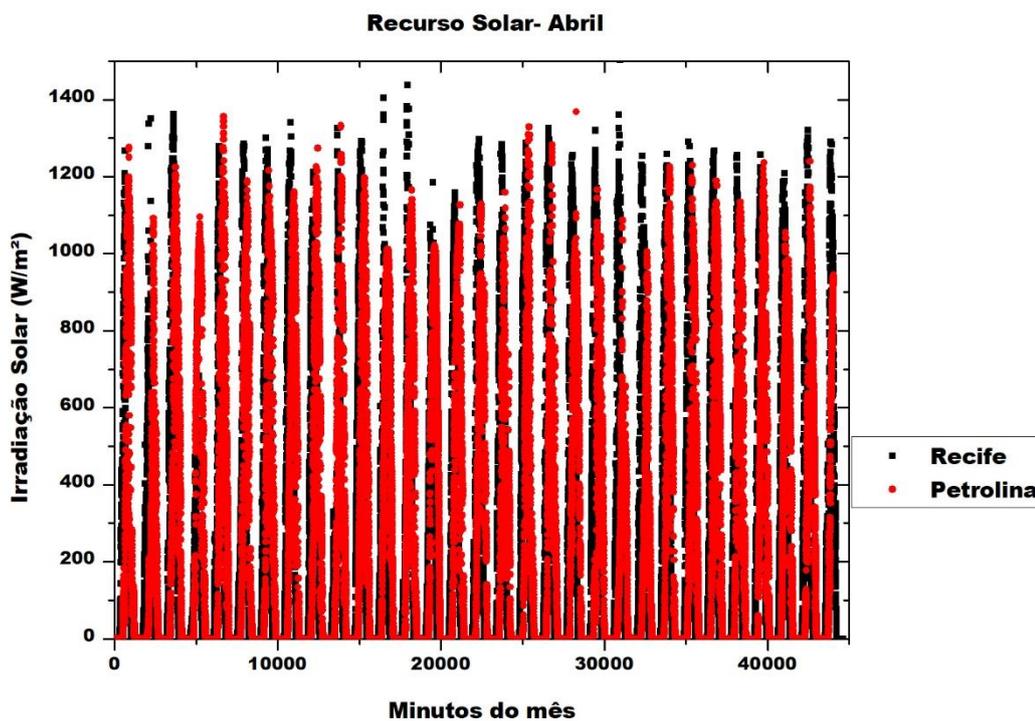
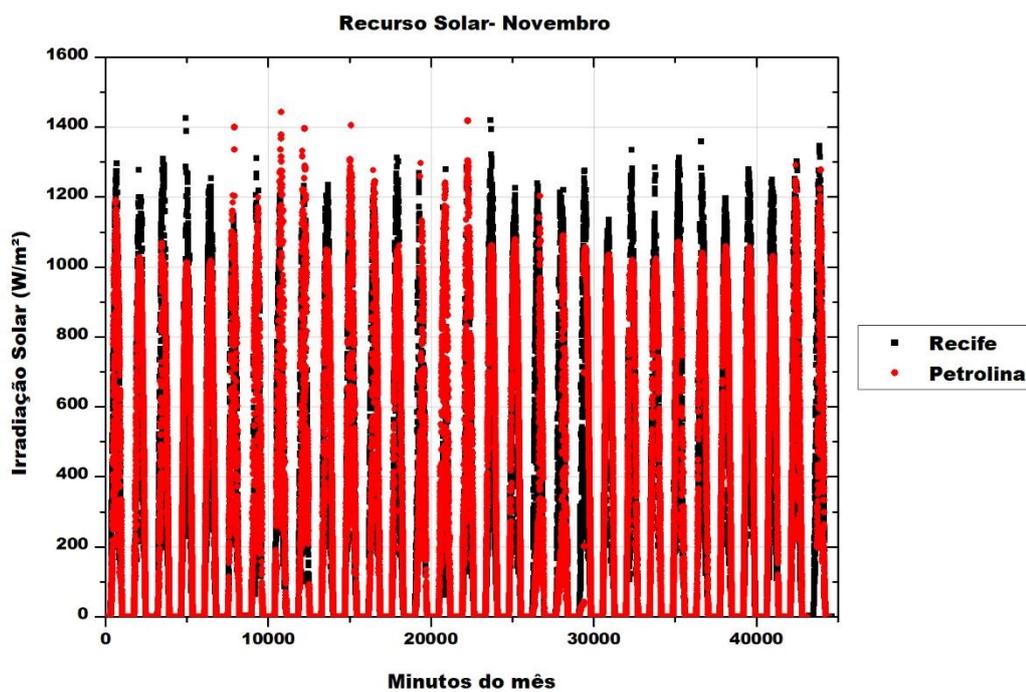


Figura 53: Comparação do Recurso Solar no mês de Novembro

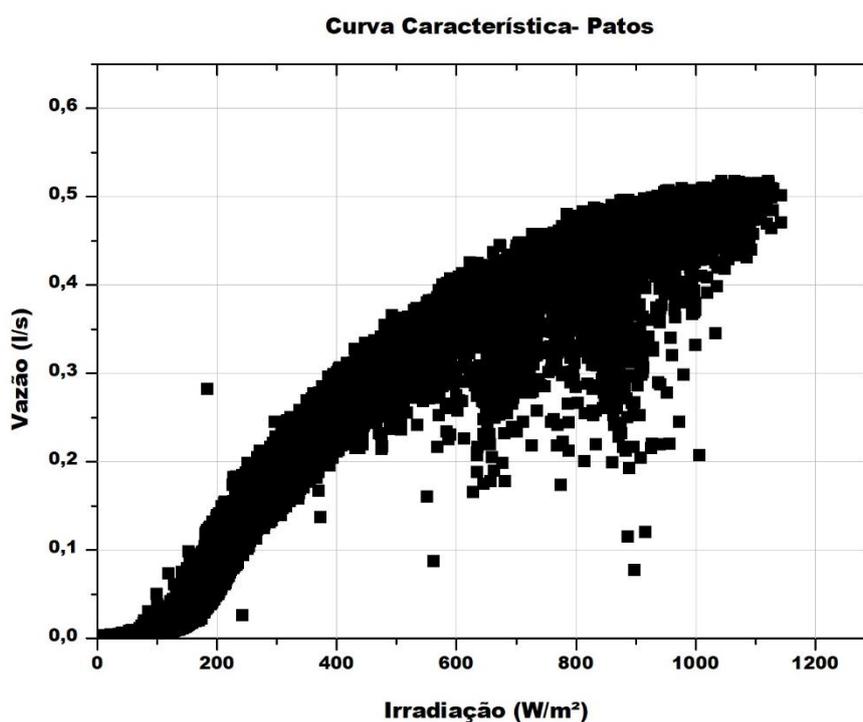


O comportamento foi observado em todos os outros meses. Não se sabe o motivo porque as medidas em Petrolina foram menores que as de Recife. Por isso, toda a metodologia feita para Petrolina foi repetida para Patos –PB (7,01°S, 37,08°O), para 24 metros.

5.7 ESTIMATIVA DO COMPORTAMENTO DO SBFV EM PATOS

A simulação para Patos foi realizada apenas um ano devido à escassez de dados nessa localidade. O comportamento do SBFV para uma altura manométrica de 24 metros em Patos está mostrado na figura 54.

Figura 54: Comportamento do SBFV em Patos, altura manométrica 24 m



Fonte: Autor

O SBFV em Patos bombeou quase 40% a mais que em Recife, que é coerente com o que se espera da realidade. A comparação direta de Patos com Recife está apresentada nas tabelas 12 e 13.

Tabela 12: Resumo da estimativa anual em Patos- PB

Patos-PB		
Irradiação média mensal diária	MJ/m ²	volume bombeado por dia (litros)
Janeiro	18,9	10272
Fevereiro	20,1	10856
Março	22,4	11888
Abril	22,6	11975
Maio	19,9	10493
Junho	18,4	9892
Julho	19,3	10324
Agosto	22,3	11754
Setembro	22,6	12052
Outubro	21,2	11456
Novembro	19,5	10476
Dezembro	18,5	10134
Média Anual	20,5	12694

Fonte: Autor

Tabela 13: Resumo da estimativa anual em Recife-PE

Recife-PE		
Irradiação média mensal diária	MJ/m ²	volume bombeado por dia (litros)
Janeiro	14,2	7232
Fevereiro	16,3	8393
Março	17,4	8826
Abril	15,0	6759
Maio	13,4	6674
Junho	12,9	6130
Julho	13,3	7057
Agosto	15,1	7585
Setembro	15,1	7714
Outubro	14,5	7471
Novembro	14,2	7335
Dezembro	14,3	7245
Média Anual	14,6	7368

Fonte: Autor

É possível perceber que o volume bombeado em Patos foi maior em todos os meses do ano que em Recife, bem como a energia total disponível. Obviamente, em Patos tem-se uma quantidade menor de nuvens que possibilita uma menor

intermitência solar, contribuindo assim com o aumento da quantidade de água bombeada.

5.8 DIMENSIONAMENTO DO RESERVATÓRIO

Com a simulação de bombeamento para 1 ano, em Patos, foi calculado a média do volume bombeado por hora, ou seja, as vazões que eram calculadas por minuto foram aglutinadas por hora. Posteriormente foram calculadas as médias horárias e esses foram os valores utilizados para dimensionamento do reservatório.

As vazões médias horárias foram utilizadas para o dimensionamento do reservatório de água. O primeiro passo foi calcular o balanço do consumo de água tendo como volume de controle a parede externa do reservatório, ou seja, independentemente de seu volume. O consumo diário foi igual ao bombeado em média no mês de junho, 10.500 L, que equivale ao consumo médio de 50 pessoas ou 15 famílias no Brasil.

Em seguida, é necessário definir o tamanho do reservatório para assim calcular os níveis de carregamento do tanque, além do déficit do volume excessivo, e da probabilidade de perda de abastecimento eq. (s) 4, 5, 6 e 7, respectivamente:

Os cálculos foram para 6 tamanhos de reservatórios diferentes, variando de meio dia (5.250 litros) a 5 dias (52.500 litros) de autonomia.

O último passo foi calcular o custo da água bombeada ao longo de toda a vida útil do sistema por meio da adaptação feita no CNAB, descrito no item 4.7. Todos os preços de componentes do sistema foram obtidos no mercado nacional; os custos de manutenção e operação foram retirados da literatura e a vida útil do sistema foi determinada como 25 anos.

Foi definida uma altura de reservatório de 7 metros acima do chão; a tabela 14 detalha o preço, tanto da estrutura quanto do reservatório, para cada tamanho de reservatório, já que os custos só dependem desse parâmetro.

O valor do SBFV é o mesmo e independe da profundidade do poço ou da altura do reservatório, e também está na tabela 14.

O custo de um poço cilíndrico foi calculado por Gomes et. al. em 2013 (49) e foi atualizado para 2019 pelo índice geral de preços do mercado para um valor de R\$ 417,00 por metro de poço. A taxa de juros para o cálculo do CNAB foi de 6,5% ao ano e o custo de manutenção e operação foi de 1% do custo inicial do investimento.

O detalhamento dos valores está expresso para 24 metros na tabela 14:

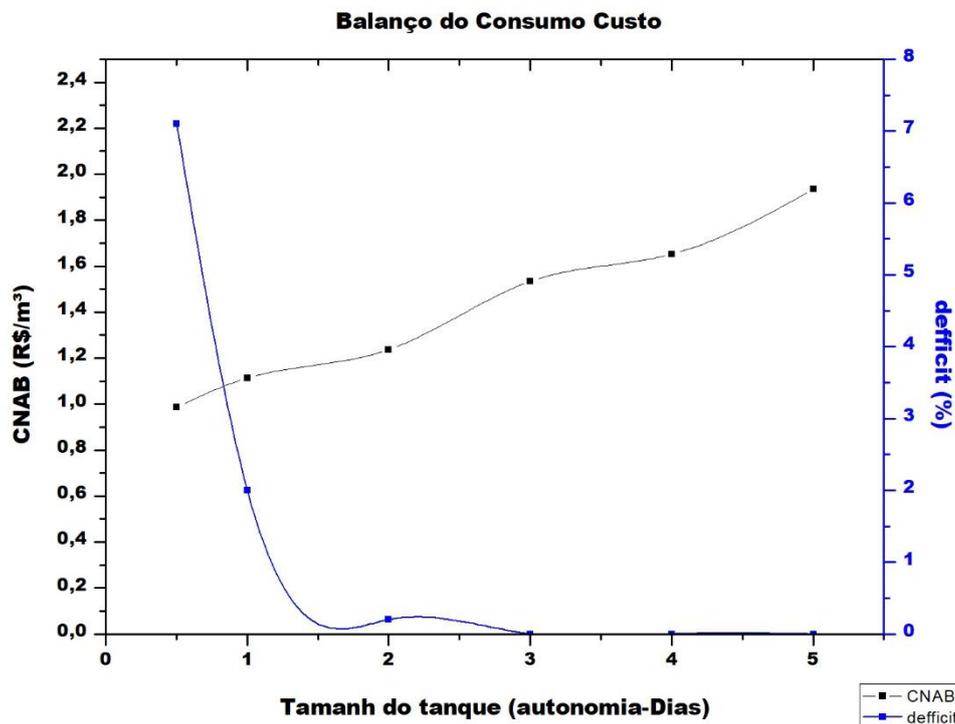
Tabela 14: Custo para o sistema com poço de 17 metros

Componente	Custo (R\$)					
	5.250 litros	10.500 litros	21.000 litros	31.500 litros	42.000 litros	52.500 litros
Armazenamento	1.600	3.000	6.300	9.300	18.600	21.600
Estrutura	5.800	9.000	13.000	22.000	44.000	53.000
Poço	7.090	7.090	7.090	7.090	7.090	7.090
Arranjo FV	4.800	4.800	4.800	4.800	4.800	4.800
Bomba+inversor	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000

Fonte: Autor

Os resultados desse dimensionamento estão expostos na figura 55:

Figura 55: Curva da probabilidade de perda de abastecimento e custo da água bombeada



Fonte: Autor

Como esperado, a probabilidade de perda de abastecimento diminui com o aumento de reservatório, de modo que a partir de três dias de autonomia o déficit permanece praticamente inalterado em zero.

Com relação ao custo, como é lógico, aumenta junto com o tamanho do armazenamento, pois o preço da construção do reservatório é muito significativo quando comparado ao custo do SBFV, pois nos últimos anos o preço deste caiu bastante.

Percebe-se que quando o reservatório tem 2 dias de autonomia (21.000), o déficit é igual a 0,2 % e tem um custo R\$ 1,20 por metro cúbico bombeado, e seria uma boa escolha para o tamanho do reservatório, pois o custo é apenas 20% maior que o do menor reservatório, e o déficit é quase 15 vezes menor.

6 CONCLUSÕES

A metodologia aqui desenvolvida utilizando RNA foi muito superior à metodologia tradicional polinomial, pois, além de possuir uma maior precisão, ela é altamente flexível, podendo ser utilizada em quaisquer localidades onde existam dados meteorológicos convencionais. Adicionalmente é capaz de simular poços onde as alturas manométricas são intermediárias das que foram experimentadas. Para uma altura de 32 metros, por exemplo, o modelo RNA teve um DP e EMQN respectivamente de -1,09% e 7,48% e o modelo polinomial teve respectivamente -7,48% e 11,3%.

A modelagem polinomial é bastante simples e alcança uma precisão relativamente boa, pelo menos nas menores alturas, já que se degrada nas alturas mais elevadas. O desvio percentual varia de -1,73 a -13,63% e o erro médio quadrático normalizado varia de 5,10 a 16,46%. Porém, essa modelagem tem as seguintes desvantagens: ela não permite inferir estimativas em alturas intermediárias, não considera de forma explícita a velocidade do vento e a temperatura operacional do arranjo e reflete somente a condição local onde foi feito o experimento. Assim, a modelagem perde precisão, caso se queira utilizar em local genérico.

A maioria dos bancos de dados disponíveis no mundo não conta com a medida de irradiação solar em planos que não estejam na horizontal; a falta desse dado causa uma grande dificuldade para o uso da metodologia aqui descrita. Isso foi sanado com a construção de um modelo RNA que calcula a irradiação no plano do arranjo FV. A modelagem teve um bom resultado estimando a irradiação no plano inclinado, com DP de -0,59 e EMQN de 7,95%

O modelo de Skoplaqui (37) para o cálculo da temperatura operacional do módulo teve um desempenho muito próximo da modelagem RNA desenvolvida. Em comparação, os EMQN resultantes foram respectivamente de 8,9% e 9,73%; sendo assim, demonstrou-se que qualquer um dos dois poderia ser o escolhido para aplicações propostas no trabalho.

A simulação do volume de água bombeada para Petrolina, foi comprometida provavelmente por problemas no banco de dados utilizado; por isso foi necessária uma segunda simulação para Patos para verificar e diagnosticar o problema e então

realizar com precisão o dimensionamento do sistema de suprimento de água FV em regiões semiáridas. De forma inesperada em Petrolina o volume foi menor do que em Recife. Em Patos ocorreu o esperado, ou seja, o volume bombeado foi 30% maior do que o de Recife. Quanto ao dimensionamento do reservatório, constatou-se que quando a autonomia máxima é maior do que três dias, praticamente não ocorre melhoria significativa (o ganho é muito pequeno) na probabilidade de perda de abastecimento. Por outro lado, o custo da água bombeada cresce aceleradamente após esse ponto. O custo da água bombeada com armazenamento de dois dias é 10% maior do que o custo com armazenamento para um dia, porém a probabilidade de perda de carga nesse caso é 10 vezes maior. Com um reservatório de 10.500 litros vai haver falta de água, em média, um pouco mais de uma semana ao longo do ano; já com reservatório de 21.000 litros haverá em média apenas algumas horas sem água ao longo do ano. Como consequência, o ponto ótimo do reservatório, deve estar localizado entre esses dois casos.

O trabalho aqui desenvolvido foi uma ferramenta computacional que tem a capacidade de fazer uma simulação detalhada e realista do desempenho de um sistema de bombeamento FV padrão (previamente ensaiado em uma bancada de testes) em quaisquer locais do Brasil ou do mundo. Com isso o processo de elaboração de projeto de SBFV fica consideravelmente simplificado, rápido e mais barato.

7 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

As seguintes possibilidades para aperfeiçoas e completar a metodologia apresentada nesse trabalho foram identificadas:

Treinamento de uma rede capaz de calcular a irradiação incidente em ângulos diferentes de 23° mediante o uso de dados provenientes de experimentos de longo prazo de medição de irradiação direta, difusa e global no plano horizontal e em uma ampla faixa de angulação 0° a 90°).

Estimar por RNAs o comportamento da curva característica do SBFV para várias alturas intermediárias (interpolação), o que permitiria estender a simulação para quaisquer alturas dentro do intervalo experimentado.

Do ponto de vista da otimização do SBFV uma pesquisa que agregaria muito ao tema seria a investigação do efeito da refrigeração ativa do arranjo fotovoltaico, desviando uma pequena parte da água produzida e verificar se o ganho no volume da água bombada compensaria esse gasto extra de energia.

Por fim seria imprescindível a verificação e comparação experimental da simulação realizada para Patos ou Petrolina.

REFERÊNCIAS

- 1 IBGE. Disponível em:
<<http://www.brasil.gov.br/noticias/infraestrutura/2011/11/energia-eletrica-chega-a-97-8-dos-domicilios-brasileiros-mostra-censo-demografico>>. Acesso em: 01/12/2018.
- 2 FEITOSA, F A. C.; DINIZ, J. A. O.; ÁGUA SUBTERRÂNEA NO CRISTALINO DA REGIÃO SEMIÁRIA BRASILEIRA. Disponível em:
<[https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/download/28026/18153%20%20de%20FAC%20Feitosa%20%20%E2%80%8E2011%20 - Pdf%20anexo%20](https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/download/28026/18153%20%20de%20FAC%20Feitosa%20%20%E2%80%8E2011%20-Pdf%20anexo%20)>. Acesso em 07/03/2018.
- 3 DADHICH, G. E SHRIVASTAVA, V. Economic comparison of solar pv and diesel water pumping system. In 2017 International Conference on Information, Communication, Instrumentation and Control (ICICIC), pages 1–6, Aug 2017.
- 4 Atlas energia solar, ANEEL [http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/03-Energia_Solar\(3\).pdf](http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/03-Energia_Solar(3).pdf) Acesso em 28/03/2019.
- 5 ARAB, Hadj; CHENLO, F.; MUKADAM, K.;BALENZATEGUI, E. J. L.; Performance of pvwater pumping systems. Renewable Energy, 18(2):191–204, 1991.
- 6 CHAUREY, P.M.; SADAPHAL, and TYAGI, D.; Experiences with spv water pumping systems for rural applications in India. Renewable energy, 3(8):961–964, 1993.
- 7 HAMZA, ALI A. e TAHA, Azmi Z.; Performance of submersible pv solar pumping systems under conditions in the sudan. Renewable energy, 6(5-6):491–495, 1995
- 8 JAFAR, M. A model for small-scale photovoltaic solar water pumping. Renewable energy, 19(1-2):85–90, 2000.
- 9 VILELA, O. C.; e Fraidenraich, N. A methodology for the design of photovoltaic water supply systems. Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 9(5):349–361, 2001.

- 10 GAD, Helmy E. e GAYAR, El. Performance prediction of a proposed photovoltaic water pumping system at south Sinai, Egypt climate conditions. In Thirteenth International Water Technology Conference, IWTC13. Citeseer, 2009.
- 11 HAMROUNI, Hejib; JRAIDI, Moncef e CHERIF, Adnene. Theoretical and experimental analysis of the behaviour of a photovoltaic pumping system. *Solar energy*, 83(8):1335–1344, 2009.
- 12 MUHSEN, Dhiaa Halboo; GHAZALI, Abu Bakar; KHATIB, Tamer; ABED, Issa Ahmed e NATSHEH, Emad M. Sizing of a standalone photovoltaic water pumping system using a multi-objective evolutionary algorithm. *Energy*, 109:961–973, 2016.
- 13 REHMAN, S.; e MOHANDDES, M. Splitting global solar radiation into diffuse and direct normal fractions using artificial neural networks. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 34(14):1326–1336, 2012.
- 14 FERNÁNDEZ, Eduardo F.; ALMONACID, F.; RODRIGO, P. e PÉREZ-HIGUERAS, P. Calculation of the cell temperature of a high concentrator photovoltaic (hcpv) module: a study and comparison of different methods. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 121:144–151, 2014
- 15 VEERACHARY, Mummadi e YADAI AH, Yadaiah. Ann based peak power tracking for pv supplied dc motors. *Solar Energy*, 69(4):343–350, 2000
- 16 BAKELLI, Y., e KAABECHE, A. Optimal size of hybrid photovoltaic/diesel water pumping system with tank storage. *Revue des Energies Renouvelables*, 21(2), 327-340, 2018
- 17 NEKKACHE, A.; BOUZIDI, B.; KAABECHE, A.; e BAKELLI, Y. Hybrid PV-Wind based water pumping system optimum sizing: a PSO-LLP-LPSP optimization and cost analysis. In 2018 International Conference on Electrical Sciences and Technologies in Maghreb (CISTEM) (pp. 1-6). IEEE., 2018
- 18 SBA, K. M.; BAKELL Y.; KAABECHE, A., e KHENFOUS S. Sizing Of A Hybrid (Photovoltaic/Wind) Pumping System based On Metaheuristic Optimization Methods. In 2018 International Conference on Wind Energy and Applications in Algeria (ICWEAA) (pp. 1-6). IEEE, 2018.

- 19 HADWAN, M., e ALKHOLIDI, A. Assessment of factors influencing the sustainable performance of photovoltaic water pumping systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 92, 307-318, 2018.
- 20 DJERIOU, S.; KHELDOUN, A. e MELLIT, A. Efficiency improvement in induction motor-driven solar water pumping system using golden section search algorithm. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 43(6), 3199-3211, 2018.
- 21 BENGHANEM, M.; DAFFALLAH, K. O., e ALMOHAMMEDI, A. Estimation of daily flow rate of photovoltaic water pumping systems using solar radiation data. *Results in Physics*, 8, 949-954, 2018.
- 22 MEUNIER, S.; HEINRICH, M.; QUÉVAL, L.; CHERNI, J. A.; VIDO, L.; DARGA, A.; & MARCHAND, C. A validated model of a photovoltaic water pumping system for off-grid rural communities. *Applied Energy*, 241, 580-591, 2019.
- 23 MUHSEN, D. H.; KHATIB, T.; e ABDULABBAS, T. E. Sizing of a standalone photovoltaic water pumping system using hybrid multi-criteria decision making methods. *Solar Energy*, 159, 1003-1015, 2018.
- 24 AL-BADI, A.; YOUSEF, H.; AL MAHMOUDI, T.; AL-SHAMMAKI, M.; AL-ABRI, A.; e AL-HINAI, A. Sizing and modelling of photovoltaic water pumping system. *International Journal of Sustainable Energy*, 37(5), 415-427, 2018.
- 25 YAICHI, M.; FELLAH, M. K.; TAYEBI, A. e BOUTADARA, A. A fast and simplified method using non-linear translation of operating points for PV modules energy output and daily pumped water to predict the performance of a stand-alone photovoltaic pumping system at different heads. *Renewable Energy*, 133, 248-260, 2019.
- 26 BARLOW, R., et al. *Solar pumping: an introduction and update on the technology, performance, costs, and economics*. World Bank, 1993
- 27 HAMIDAT, A.; BENYOUCEF, B., e HARTANI, T.. Small-scale irrigation with photovoltaic water pumping system in sahara regions. *Renewable Energy*, 28(7):1081–1096, 2003
- 28 OLIVEIRA, Rinaldo Melo de, *Condicionamento de Potência de uma Motobomba em um Sistema de Bombeamento Fotovoltaico Através de um Conversor de Frequência*, 2004

- 29 COUTINHO, Fábio A. B., CHIGUERU, Tiba, OLIVEIRA, Rinaldo Melo de. Modelagem de um sistema de bombeamento fotovoltaico utilizando redes neurais artificiais e comparativo com modelagem tradicional, CEBENS, 2018
- 30 BARROS, Gielton Lima. Física, 3ª série: ensino médio: revisional. Belo Horizonte: Editora Educacional, 2012, p. 247
- 31 Fabricação de um painel solar. Disponível em:
<<https://www.portalsolar.com.br/passos-a-passos-da-fabricacao-do-painel-solar.html>>, Acesso em: 03/03/2018
- 32 Calculating Current Ratings of Photovoltaic Modules
<<http://ecmweb.com/green-building/calculating-current-ratings-photovoltaic-modules>>, Acesso em: 03/03/2018
- 33 SALAS, V.; OLIAS, E.; BARRADO. A.; e LAZARO. A. Review of the maximum power point tracking algorithms for stand-alone photovoltaic systems. Solar energy materials and solar cells, 90(11):1555–1578, 2006
- 34 RAMPINELI, G. A.; E KRENZINGER, A. Comportamento do fator de forma de módulos fotovoltaicos sob condições variáveis de irradiância, temperatura e sombreamento de células. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, 11:04–09, 2007
- 35 SOTO, Widalys DE; KLEIN, S. A. e BECKMAN, W. A. Improvement and validation of a model for photovoltaic array performance. Solar energy, 80(1):78–88, 2006.
- 36 MOHARRAM, K. A., et al. Enhancing the performance of photovoltaic panels by water cooling. Ain Shams Engineering Journal 4.4: 869-877, 2013.
- 37 SKOPLAKI, E., BOUDOUVIS, A. G., e PALYVOS, J. A. A simple correlation for the operating temperature of photovoltaic modules of arbitrary mounting. Solar Energy Materials and Solar Cells, 92(11), 1393-1402, 2008.
- 38 FITZGERALD, A.E., CHARLES, Kingsley Jr., UMANS, Stephen D., Máquinas Elétricas, 6ª edição: Editora Bookman, 2012, P 177

- 39 RAMOS, Ricardo Alan Verdú; SILVA, João Batista Campos. Máquinas Hidráulicas e Térmicas, 2009, p.7
- 40 BOUTELHIG, A., BAKELLI, Y., MAHAMMED, I. H., & ARAB, A. H. Performances study of different PV powered DC pump configurations for an optimum energy rating at different heads under the outdoor conditions of a desert area. *Energy*, 2012, 39(1), 33-39.
- 41 KALOGIROU, S. A. Artificial neural networks in renewable energy systems applications: a review. *Renewable and sustainable energy reviews*, 5(4), 373-401, 2001.
- 42 YADAV, A. K., e CHANDEL, S. S. Solar radiation prediction using Artificial Neural Network techniques: A review. *Renewable and sustainable energy reviews*, 33, 772-781, 2014.
- 43 OLIVEIRA, A. C. S.; SOUZA, A. A.; LACERDA, W. S. e GONÇALVES, L. R. Aplicação de redes neurais artificiais na previsão da produção de álcool. 2010
- 44 Localizações das estações SONDA. <http://sonda.ccst.inpe.br/index.html>
Acessado 28 de setembro de 2018.
- 45 Variáveis medidas nas estações SONDA. Disponível em:
<<http://sonda.ccst.inpe.br/index.html>> Acessado em 28 de setembro de 2018
- 46 PEREZ, R.; INEICHEN, P.; SEALS, R.; MICHALSKY, J.; e STEWART, R. Modeling daylight availability and irradiance components from direct and global irradiance. *Solar energy*, 44(5), 271-289, 1990.
- 47 OLMO, F. J.; VIDA, J.; FOYO, I.; CASTRO-DIEZ, Y., e ALADOS-ARBOLEDAS, L. Prediction of global irradiance on inclined surfaces from horizontal global irradiance. *Energy*, 24(8), 689-704, 1999.
- 48 FUNK, A. e DEOREO, W. B. Embedded energy in water studies study 3: End-use water demand profiles. Prepared by Aquacraft, Inc. for the California Public Utilities Commission Energy Division, Managed by California Institute for Energy and Environment, CALMAC Study ID CPU0052, 2011.

49 GOMES, M. C. R.; CAVALCANTE, I. N.; LEMOS, E. C. L. Oferta x custo da água subterrânea no campus universitário do PICI/UFC. Estudos Geológicos UFPE.- 2013

APÊNDICE A- LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1–	Fator de Forma	32
Equação 2–	Correlação de Skoplaki	35
Equação 3 –	Correlação de Olmo	49
Equação 4 –	Nível de Carregamento do Tanque	50
Equação 5 –	Déficit de Abastecimento.....	50
Equação 6 –	Volume de excesso de água bombeada	50
Equação 7 –	Probabilidade de Perda de Abastecimento	51
Equação 8 –	Tensão experimental do gerador	59
Equação 9 –	Potência gerada no arranjo	61
Equação 10 –	Eficiência do gerador FV.....	61
Equação 11 –	Potência hidráulica.....	66
Equação 12 –	Eficiência global do sistema	66
Equação 13 –	Eficiência do conjunto motor-bomba	67
Equação 14 –	Desvio Percentual	68
Equação 15 –	Erro médio quadrático normalizado	68
Equação 16 –	Custo Nivelado de bombeamento de água	68
Equação 17 –	Curva Característica	69
Equação 18 –	Declinação Solar.....	75
Equação 19 –	Altitude Solar	75
Equação 20 –	Ângulo Horário	75
Equação 21 –	Azimute Solar	75
Equação 22 –	Ângulo de Incidência	76
Equação 23 –	Irradiação Extraterrestre.....	76