

# MODELAGEM DE UM SISTEMA DE BOMBEAMENTO FOTOVOLTAICO UTILIZANDO REDES NEURAS ARTIFICIAIS E COMPARATIVO COM MODELAGEM TRADICIONAL

Fábio A. B. Coutinho – fabiocoutinho07@hotmail.com

Tiba Chigueru – tiba@ufpe.br

Rinaldo O. Melo – rinaldoom@hotmail.com

Universidade Federal de Pernambuco, Departamento de Energia Nuclear

**Resumo.** Este trabalho faz o comparativo entre uma modelagem utilizando Redes Neurais Artificiais e uma modelagem utilizando polinômios para o funcionamento de um Sistema de Bombeamento Fotovoltaico. Ambos os modelos permitem estimar a vazão para várias condições, sendo que, o modelo com RNA permite a simulação para alturas não experimentadas. Depois os modelos foram testados por meios de indicadores estatísticos e foi verificado que o modelo utilizando RNA é bem mais preciso alcançando níveis de precisão em que o seu erro quadrático médio é aproximadamente 45 vezes menor do que o erro quadrático médio do modelo polinomial.

**Palavras-chave:** Energia Solar, Sistema de Bombeamento Fotovoltaico, Aplicações de RNA em energias renováveis

## 1. INTRODUÇÃO

### 1.1 Caracterização do Problema

A água que existe em nosso planeta é praticamente a mesma a vários milhares de anos, porém, o acesso à água potável ainda não é fácil para muitas pessoas ao redor do mundo. Aproximadamente 663 milhões não têm acesso à água potável e desses, 522 milhões estão em áreas rurais (Organização Internacional WaterAid, 2016). A água também é primordial para a agricultura e pecuária, assim como, um insumo de grande importância para produção de comida.

Por vezes, a água está em locais de difícil acesso, seja em locais distantes ou mesmo subterrâneos, dessa forma é necessário transportá-la, no Brasil, muitas vezes esses lugares também estão distantes da rede elétrica dificultando ainda mais o acesso.

A água deve ser transportada até o lugar onde é necessário usá-la, e as principais fontes convencionais de energia para bombeamento, além de energia elétrica da rede, são os combustíveis fósseis, mas ambos os métodos dependendo do lugar têm alto custo de operação e de instalação. Por isso, a escolha de energia fotovoltaica (FV) para bombeamento de água vem ganhando cada vez mais popularidade (Munzer et al., 2013). O custo dos módulos está sendo reduzido em todo o mundo. O custo de capital do sistema de bombeamento de água PV pode ser considerado o principal barreira para a aplicação do sistema em um país em desenvolvimento. Assim sendo, os esforços de otimização são principalmente focados em minimizar o custo de capital do sistema. (Girma et al., 2015).

Mas mesmo o custo inicial do SBFV sendo maior do que dos modos de bombeamento tradicional, e retorno do investimento acontece em 4-6 ano enquanto a vida útil do sistema é de 20-25 anos (Chandel et al.).

Como o sistema de bombeamento fotovoltaico (SBFV) é uma importante aplicação de energia fotovoltaica e há muito interesse em modelar, otimizar e controlar esse tipo de sistema (Amer e Younes, 2006).

Um SBFV também apresenta outras vantagens como a fácil manutenção e o baixo custo operacional, além de ser uma tecnologia que produz energia limpa depois de feito o investimento inicial (Harishankar et al., 2014).

Diversas pesquisas têm sido focadas no SBFV, na relação entre a irradiação solar disponível com a demanda de água, além de estratégias para aumentar a sua eficiência (Boutelhig et al., 2012). Um importante passo para otimizar e controlar esse tipo de sistema é a obtenção da curva característica de um SBFV, que resume o volume bombeado em função das condições meteorológicas locais (Irradiação solar, temperatura e velocidade do vento) e a altura manométrica a ser vencida pelo sistema. Esse último aspecto refere-se as condições gerais de fonte de água e da altura a ser recalçada. Tradicionalmente todos esses fatores são resumido em uma curva de um polinômio de segundo grau.

A obtenção de uma curva característica para diversas alturas é um processo demorado e requer uma bancada de testes para a aquisição da curva característica para alturas contínuas, que normalmente não é feita, seja pelo trabalho demorado ou pelos custos envolvidos. Dessa maneira, o dimensionamento e as especificações de um SBFV para um local qualquer em que a altura manométrica total (profundidade do poço e altura de recalque) e condições meteorológicas locais são diferentes, normalmente é feito, utilizando-se a interpolação das curvas características obtidas em bancadas de testes, o que ocasiona perdas de precisão no projeto. Então, para evitar essa situação seria interessante a obtenção dela de forma aproximadamente contínua em relação à altura de recalque. Uma forma de interpolar as curvas em alturas já testadas é utilizando Redes Neurais Artificiais (RNA) para modelar.

RNA é uma poderosa ferramenta computacional para resolver diversos problemas como aproximações de funções complexas, associação, reconhecimento e geração de modelos complexos, já existe um grande histórico delas aplicados as energias renováveis (Soteris, 2001).

## 1.2 Sistema de Bombeamento de água fotovoltaico

A configuração básica de um sistema de abastecimento de água é: a fonte, o sistema de transporte (tubos, conexões e bombeamento), o tanque de armazenamento e o ponto de uso final seja para uso doméstico ou para agropecuária, Figs. 1 e 2. Quando a energia responsável por transportar a água do sistema é produzida por painéis fotovoltaicos o sistema é chamado de sistema de bombeamento fotovoltaico.

O sistema de bombeamento pode servir para transportar água para uso doméstico, para uso na pecuária ou ainda para agricultura. As Fig. 1 e 2 mostram essas configurações. A fonte de água na maioria das vezes estão abaixo do nível aonde a água será usada, muitas vezes a água está no subsolo, sendo assim essa diferença de altura deve ser vencida pelo sistema de bombeamento e mesmo nos casos aonde a água está no mesmo nível de altura de onde ela será usada o sistema ainda deve ser capaz de vencer as perdas por atrito na parede interna da tubulação.

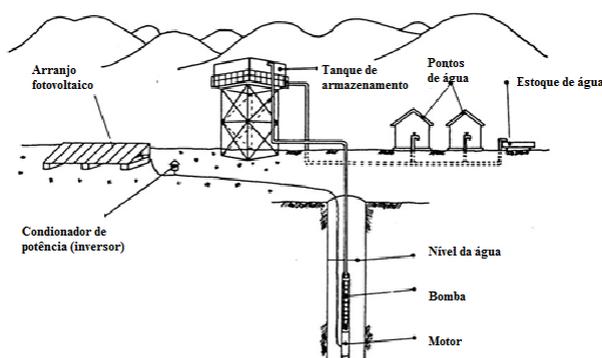


Figura 1 – Sistema de abastecimento de água para fins de consumo doméstico

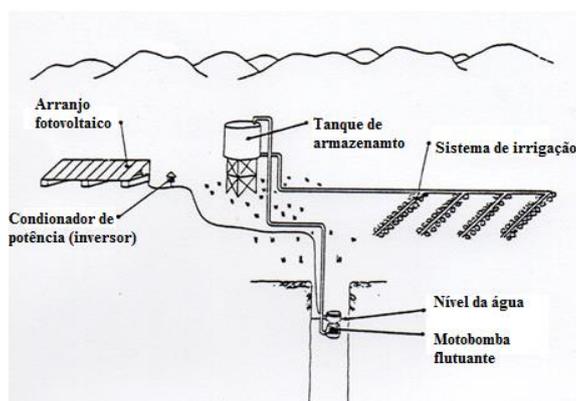


Figura 2 – Sistema de abastecimento de água para fins de irrigação

As diferentes configurações de SBFV incluem sistemas de armazenamento de energia para a utilização em momentos de baixa irradiação solar, pode-se armazenar energia elétrica por meio de conjunto de baterias que armazenam o excedente produzido pelo arranjo FV ou energia potencial gravitacional transportando a água para um tanque de armazenamento de altura elevada em relação ao local aonde haverá a demanda.

Existem diferentes configurações para fazer a ligação entre o gerador fotovoltaico e a bomba. A ligação pode ser feita diretamente usando um motor de corrente contínua para a bomba ou por meio de um inversor de frequência, com um motor de corrente alternada para a bomba. Esta última é a mais utilizada atualmente e pode ser visto na Fig. 3.

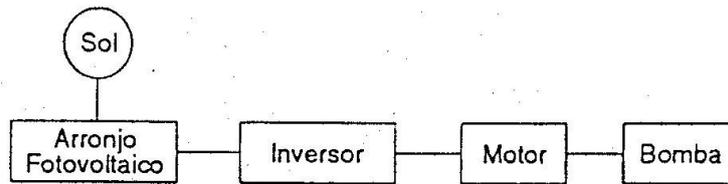


Figura 3- Configuração predominante do Bombeamento de água FV

Entre o gerador e a carga existe o controlador chamado de seguidor de máxima potência (PMP), com um algoritmo de rastreamento para condicionar o gerador fotovoltaico a operar no ponto ótimo para obter a máxima eficiência do gerador. Esse tipo de controlador é mais eficiente, principalmente quando trabalha com baixos níveis de irradiação solar. Existe também o controlador que opera com ponto de trabalho fixo, nesse caso escolhe-se uma tensão próxima à tensão de potência máxima e com a ajuda de um controlador, geralmente embutido no inversor ou conversor, que mantém a carga trabalhando próximo desse ponto. Esse modo de trabalho é menos eficiente do que com seguidor de máxima potência.

Vale salientar que há um valor de irradiancia na qual a vazão do sistema é zero, este é chamado de ponto de irradiação crítica. Esse valor depende de todas as características do sistema e está presente independente do meio de ligação entre o arranjo e o motor. A seguir está uma descrição de cada um dos principais componentes do SBFV.

### 1.2.1 Arranjo fotovoltaico

A energia utilizada pelo SBFV é gerada por um arranjo fotovoltaico. O gerador fotovoltaico é formado por um arranjo de vários módulos fotovoltaicos em série ou em paralelo de modo que, produzam tensão e corrente compatíveis com as necessárias para o funcionamento do sistema.

### 1.2.2 Inversor

Os inversores são equipamentos capazes de converter corrente contínua em alternada. Os inversores isolados (não acoplados à rede elétrica) como é no caso de sistemas de bombeamento operam com tensões de entrada de 12, 24, 48, 120 volts (CC) que são convertidos de forma geral em 120 ou 240 volts(AC), na frequência de 50 a 60 Hertz. Os inversores atuais têm uma eficiência de 95% na potência nominal de saída, mas a eficiência cai bastante quando se afasta da potência nominal chegando até 75-80% quando a potência de saída é 50% da potência nominal.

### 1.2.3 Conjunto moto-bomba

São unidades de bombeamento formado por um motor, que pode ser de corrente contínua ou alternada e por uma bomba que pode ser dinâmica ou volumétrica. O tipo do motor é escolhido de acordo com a escolha do meio de ligação entre a carga e o gerador. O tipo da bomba é escolhido levando em conta as necessidade de vazão e a altura manométrica a ser vencida. A Fig. 4 mostra um diagrama onde é possível ver o tipo de bomba mais indicado para várias situações de pressão manométrica e vazão.

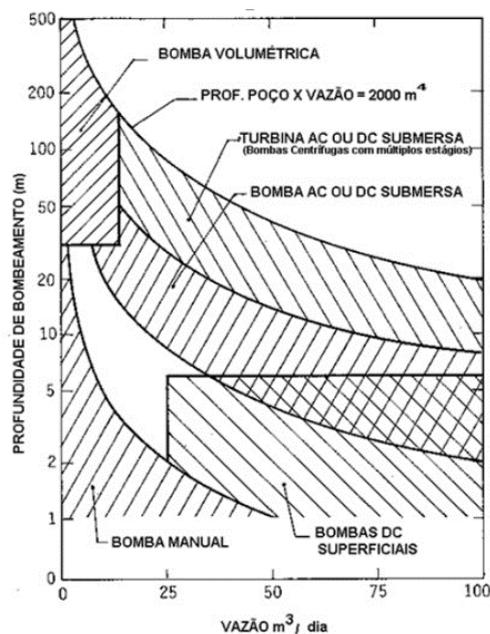


Figura 4 – Tipos de bombas recomendados para diferentes alturas e vazões

### 1.3 Redes Neurais artificiais

Redes Neurais Artificiais (RNAs) são ferramentas adequadas para a solução de problemas complexos. Uma RNA é um conjunto de pequenas entidades (neurônios) que estão conectadas entre si e que transferem informações de uma para outra. Cada unidade tem dois valores associados, o valor de entrada e o seu peso. A saída da unidade é uma função desses respectivos valores.

Um diagrama da arquitetura do RNA pode ser visto na Fig. 5, as camadas ocultas são chamadas dessa forma porque depois de construída a RNA funciona como uma caixa preta, o número de camadas ocultas e de neurônios por camada diferem de uma RNA para a outra.

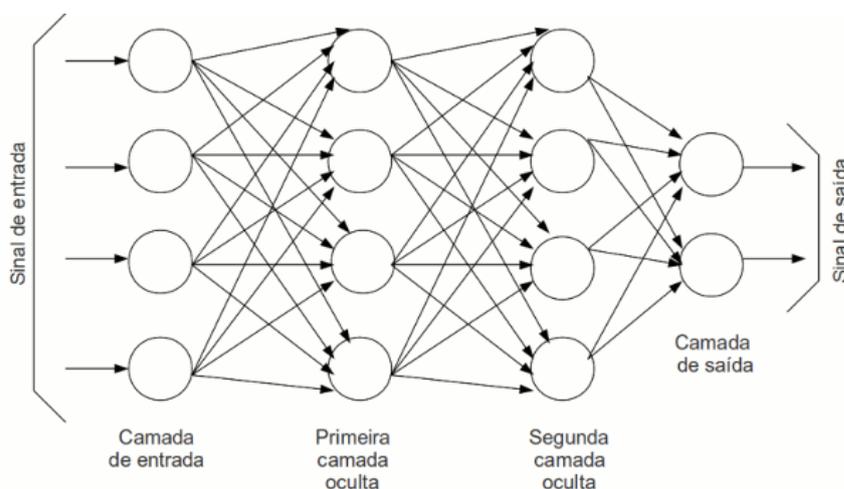


Figura 5- Esquema da arquitetura de uma rede neurais com 2 níveis ocultos

Quando uma excitação é feita na entrada da rede e tem um resultado desejado na saída ao longo das sinapses há, o armazenamento de pesos para cada neurônio no caminho e esses pesos são modificados baseado na entrada e na saída (Soteris, 2001).

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 cada 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 a entrada colocada na RNA que por sua vez produz a sua saída e então esse valor produzido pela RNA é comparada com a saída medida e calcula-se o erro, se o erro for insatisfatório deve-se treinar novamente a rede, mas com a ressalva que, dependendo da arquitetura da rede existe um número de pontos para o treinamento que a rede deixa de aprender e se torna viciada, parando assim de calcular e apenas mostrando saídas já introduzidas no treinamento.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 Descrição da Bancada de testes

A bancada de teste para sistema de bombeamento de água fotovoltaica (SBFV) está localizada em Recife-PE (latitude: 08°03'14" S, longitude 34°52'52" W), possui uma torre com alturas variáveis de (12, 22, 32 e 42 metros). A Fig. 6 mostra respectivamente o desenho esquemático e uma foto real da bancada

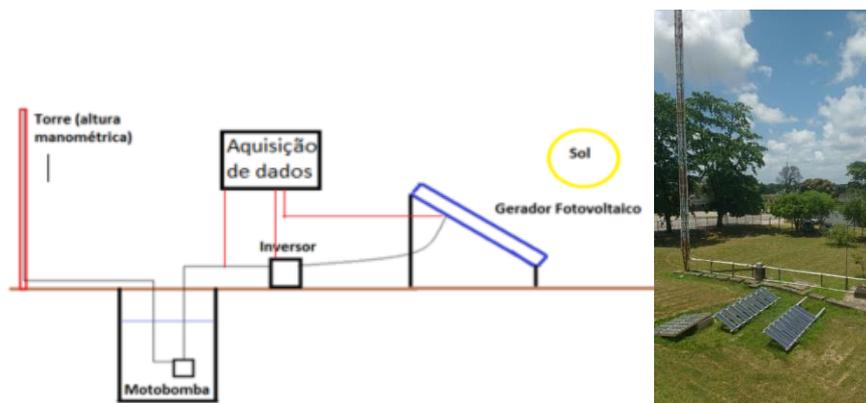


Figura 6- Layout esquemático do sistema e real

## 2.2 Arranjo Fotovoltaico

O arranjo foi feito com todos os módulos em série, com uma inclinação de 23° e alinhados no sentido N-S, as características nominais para um módulo estão descritas na tabela 1, e foram utilizados 16 módulos em série gerando uma potência máxima nominal de 880 W e uma tensão de potência máxima nominal de 278V.

Tabela 1- Características nominais do módulo FV utilizado

Potência máxima	55±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

Foi extraído a curva de característica do arranjo e as principais informações estão expressas na Tab. 2.

Tabela 2- Características de funcionamento 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 <sup>2</sup>
Irradiancia usada	970 W/m <sup>2</sup>
Temperatura do módulo	55° C

## 2.3 Inversor de Frequência

O inversor não conta com o seguidor de máxima potência por isso, é necessário escolher a tensão de trabalho, então, é aconselhável escolher a tensão de máxima potência medida para o arranjo, 293,7 V, para a otimização da energia gerada. As características nominais do fabricante estão na Tab. 3.

Tabela 3- Características do Inversor de frequência

Entrada: 200-240 V ± 10 %; 14,4 A; 47 a 63 Hz
Saída: 0-entrada V; 7,4 A 0-650 Hz
Motor: 1,5 kW

## 2.4 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 4 contém as informações do fabricante.

Tabela 4- 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 %

## 2.5 Parâmetros monitorados

Os parâmetros são monitorados utilizando um sistema de aquisição de dados, são lidos segundo a segundo e são armazenados a média de 60 valores (um minuto). As variáveis medidas estão descritas a seguir.

### 2.5.1 Elétricos

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

### 2.5.2 Solarimétricos

A variável solarimétrica medida foi a irradiância coletada ( $I_{col}$ ) em watts por metro quadrado, no plano do arranjo FV.

### 2.5.3 Meteorológicas

As variáveis meteorológicas medidas foram: velocidade do vento (metro por segundo); direção do vento (ângulo em relação a uma direção escolhida).

### 2.5.4 Térmicas do Arranjo PV

As variáveis medidas térmicas no arranjo foram as temperaturas (graus Celsius) em 3 pontos do arranjo FV conforme mostrado na Fig. 7.

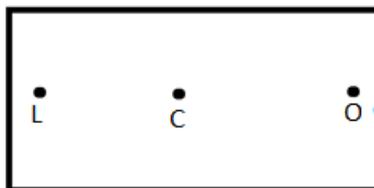


Figura 7 – Disposição dos sensores de temperaturas no arranjo PV

### 2.5.5 Hidráulicos

As variáveis hidráulicas medidas foram: altura manométrica (em metros de coluna d'água); vazão da bomba (metro cúbicos por segundo).

## 2.6 Campanha de medição e modelagem

A campanha de medição foi feita para as alturas de 12, 22 e 32 metros, passaram 12 dias para cada uma dessas alturas, e as medidas começavam às 7:00 da manhã e acabavam às 16:00, fora desse intervalo havia a incidência de sombras sobre o arranjo, o que geraria problemas nos modelos, isso totaliza aproximadamente 20.000 pontos com informações de altura manométrica, irradiação incidente no plano do arranjo, tensão e corrente na saída do arranjo, direção e velocidade do vento a temperatura em três pontos do arranjo e a vazão.

Em seguida os pontos foram divididos em 3 grupos aleatoriamente como mostrado na Fig. 8 abaixo.



Figura 8- Divisão dos dados

Os pontos do conjunto treinamento foram utilizados para treinar a RNA, essa possui 10 níveis escondidos, esse conjunto incluía pontos para todas as alturas experimentadas.

O conjunto de treinamento foi posteriormente dividido levando –se em conta as alturas e em seguida foi feita uma modelagem tradicional polinomial para cada altura. Essa modelagem consiste em fazer uma regressão do ponto de irradiação e vazão para um polinômio de segundo grau, as modelagens polinomiais estão mostradas nas Fig. 9,10 e 11.

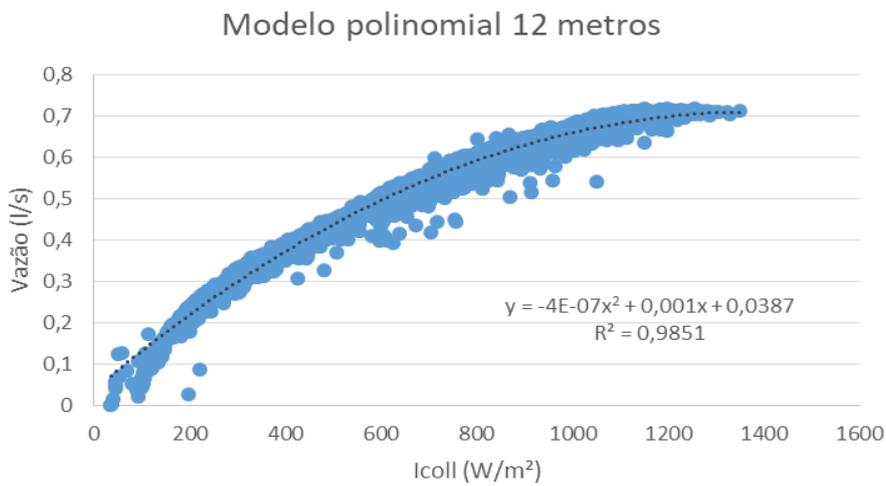


Figura 9- Modelagem polinomial- 12 metros

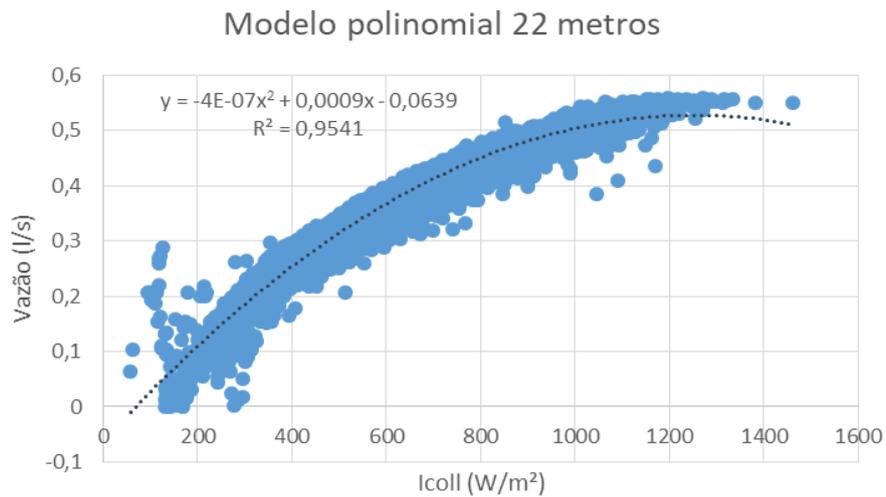


Figura 10- Modelagem polinomial- 22 metros

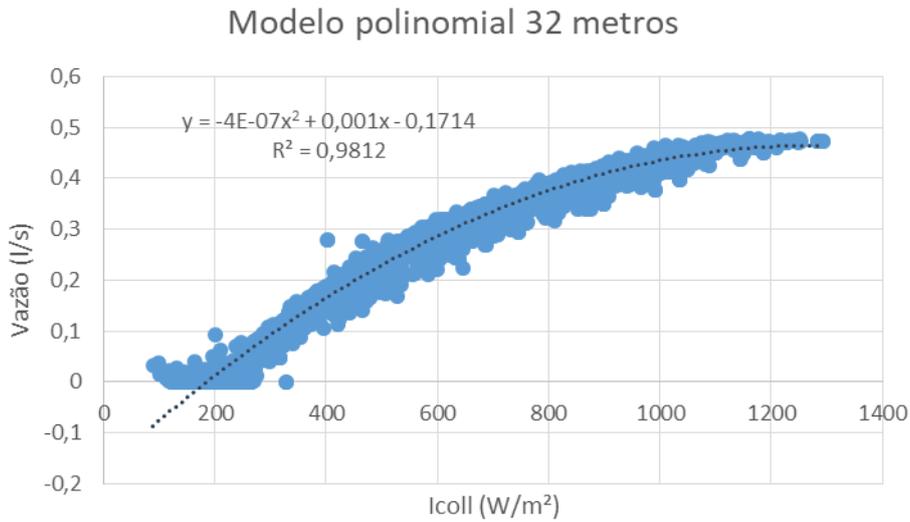


Figura 11- Modelagem polinomial- 32 metros

Nesse gráfico é possível conhecer o ponto de irradiação crítica, nesse caso igual a 75 W/m²(12 metro), 165 W/m²(22metros) e 225 W/m² (32 metros) que é a mínima irradiação necessária para o funcionamento do sistema, e também é possível observar que há uma certa dispersão, causada basicamente por dois motivos: a temperatura do gerador FV e a intermitência solar, então, posteriormente será discutido formas de minimizar a interferência de ambos os fatores no SBFV, consequentemente aumentando a eficiência geral do sistema.

O segundo grupo, o de validação, foi utilizado apenas para a RNA, para validar o treinamento e não é utilizado em nada no modelo polinomial.

O terceiro grupo, o de teste, foi utilizado colocando como entrada nos dois modelos, RNA e polinomial, e foi calculado alguns indicadores estatísticos mostrados nas equações abaixo.

$$MBE = 100 \frac{\sum_n (V_{calculado} - V_{medido})}{\sum_n V_{medido}} \quad (1)$$

$$RMSE = 100 \sqrt{\frac{\sum_n (V_{calculado} - V_{medido})^2}{n}}{\frac{\sum_n V_{medida}}{n}} \quad (2)$$

### 3. VERIFICAÇÃO E TESTES

As Fig. 10,11 e 12 são os valores do grupo de teste, plotado para cada altura a irradiação vs vazão.

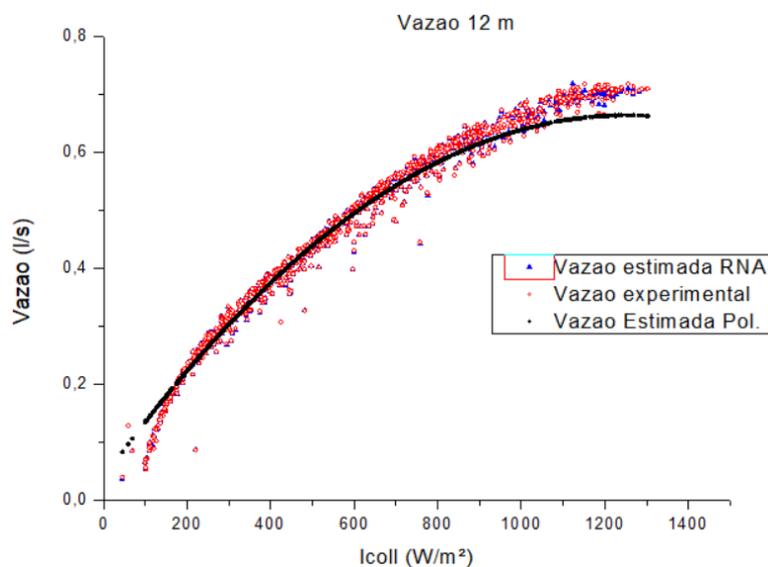


Figura 12- irradiação vs vazão - 12m

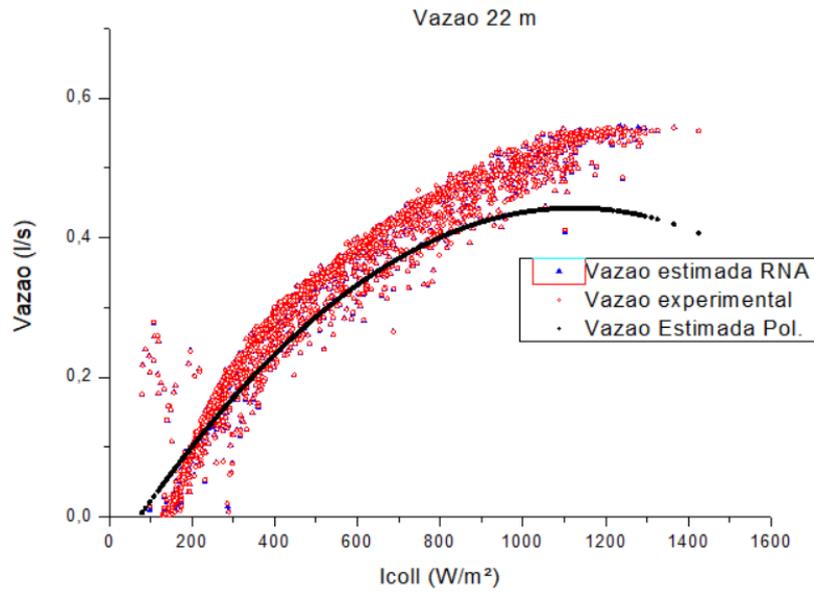


Figura 13- irradiação vs vazão 22 m

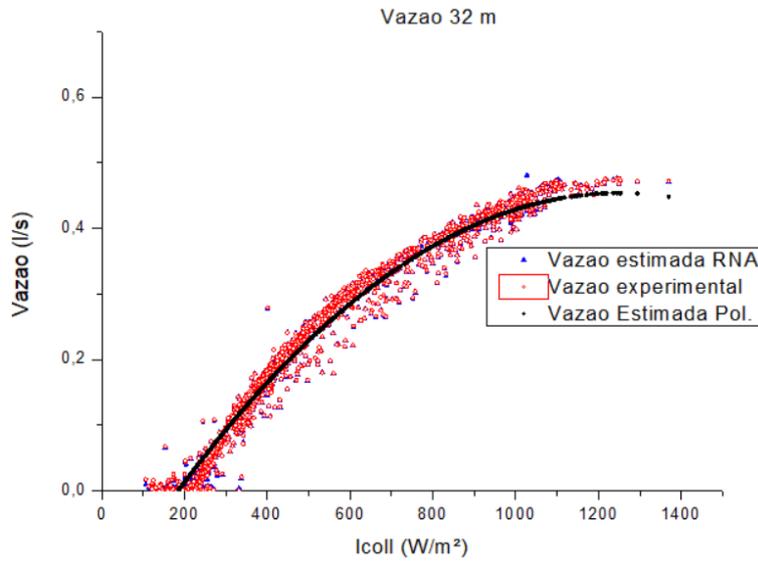


Figura 14- irradiação vs vazão 32 m

O resultado do grupo de teste foi comparado com suas respectivas entradas em ambos os modelos e os indicadores estatísticos estão expressos na Tab. 5.

Tabela 5- Resultados dos modelos

	Desvio médio quadrático RNA (%)	Desvio médio Polinomial (%)	Desvio padrão médio quadrático polinomial (%)
<b>12 metros</b>			
0,01	0,46	1,24	4,98
<b>22 metros</b>			
0,01	0,27	11,13	16,67
<b>32 metros</b>			
-0,05	0,83	0,60	9,86

#### 4. CONCLUSÃO

A modelagem utilizando RNA foi mais precisa do que a polinomial, o que já era esperado pois, a modelagem RNA é mais completa, uma vez que, leva em conta diretamente muitos fatores que estão implícitos na polinomial como: a temperatura dos módulos, direção e velocidade do vento. Vale ressaltar que por RNA pode-se estimar a vazão para alturas que não foram testadas na bancada de teste, ou seja, pode ser extrapolada para diversas alturas sem grandes perdas de precisão.

A modelagem para 22 metros apresentou uma situação em que os dias estavam mais nublados consequentemente tinham mais valores de irradiância próximos ao ponto crítico, percebido pela dispersão no gráfico próximo da vazão (eixo y) igual a 0. Como nas condições de extremos de irradiação a modelagem polinomial tem sua precisão diminuída essa foi a altura que houve mais discrepância entre as modelagens, mostrando que essa intermitência também induz erros na modelagem em RNA.

Mas, mesmo assim a modelagem polinomial ainda é uma opção viável para aplicações que não requerem precisão elevada. Porém, a modelagem em RNA também permite a simulação de condições que aumentam a eficiência, por exemplo diminuindo a temperatura de funcionamento do arranjo por refrigeração. Em um próximo trabalho serão estudadas formas de aumentar a eficiência do sistema, como a instalação de supercapacitores, além de diferentes formas de refrigerar o arranjo FV.

Para tanto ambas as modelagens podem ser utilizadas podendo-se escolher entre a simplicidade da modelagem tradicional em um polinômio de segundo grau ou a alta precisão e flexibilidade da modelagem em RNA.

#### REFERÊNCIAS

- Estratégias global de WaterAid 2015-2020. Disponível em :  
 <[https://www.google.com.br/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&ved=0ahUKEwjG2IDT1J3XAhWHkJAKHX6NCwIQFggtMAE&url=https%3A%2F%2Fwww.wateraid.org%2Fuk%2Fpublications%2Four-strategy-portuguese&usq=AOvVaw1Wurp\\_Balu0XyoigLWZayR](https://www.google.com.br/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&ved=0ahUKEwjG2IDT1J3XAhWHkJAKHX6NCwIQFggtMAE&url=https%3A%2F%2Fwww.wateraid.org%2Fuk%2Fpublications%2Four-strategy-portuguese&usq=AOvVaw1Wurp_Balu0XyoigLWZayR)> . Acesso em: 11 de outubro de 2017
- Munzer S.Y. Edab, Hasan Quandil, Mahmond Hammal,2013. A unified approach for designing a photovoltaic solar system for underground water pumping well. Energy Conversion e Management
- Misrak Grma, Abeyayu Assefa, Marta Molinas,2015. Feasibility study of a solar photovoltaic water puping system for rural Ethiopia. Environmental Science. Volume 2, Issue 3, 697-717.
- Chandel SS, Naik MN, Chandel R,2015. Review of solar photovoltaic water pumping system technology for irrigation and community drinking water supplies. Renew Sustain Energy Rev 2015:1084–99.
- Amer EH, Younes MA,2006. Estimating the monthly discharge of a photovoltaic water pumping system: model verification. Energy Convers Manage;47:2092–102.
- Harishankar S., Sathish Kumar R., Sudharsan K.P., Vignesh U. and Viveknath T.,2014, Solar Powered Smart Irrigation System. Advance in Electronic and Electric Engineering, Vol. 4(4), pp.341-346.
- Boutelhig A, Bakelli Y, Hadj Mahammed I, Hadj Arab A.,2012 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;39:33–9.
- Soteris A. Kalogirou,2001. Artificial Neural Networks in renewable energy systems applications: a review. Renewable & Sustainable Energy Reviews

#### MODELING A PHOTOVOLTAIC PUMPING SYSTEM USING ARTIFICIAL AND COMPARATIVE NEURAL NETWORKS WITH TRADITIONAL MODELING

**Abstract.** *This work makes the comparison between a modeling using Artificial Neural Networks and a modeling using polynomials for the operation of a Photovoltaic Pumping System. Both models allow estimating the flow rate for several conditions, and the RNA model allows simulation for untested heights. Then the models were tested by means of statistical indicators and it was verified that the model using RNA is much more accurate reaching levels of precision in which its mean square error is up to 50 times lower than the mean square error of the polynomial model*

**Key words:** *Solar Energy, Photovoltaic Pumping System, RNA Applications in Renewable Energies*