

AGRICULTURA VERDE: ENERGIA FOTOVOLTAICA EM BOMBEAMENTO HIDRÁULICO PARA AVANÇOS SUSTENTÁVEIS NA IRRIGAÇÃO LOCALIZADA

Green Agriculture: Photovoltaic Energy in Hydraulic Pumping for Sustainable Advances in Localized Irrigation

Ricardo Aparecido Santos
Universidade Federal de Goiás

João Areis Ferreira Barbosa Júnior
Instituto Federal Goiano

Andréa dos Guimarães de Carvalho
Universidade Federal de Goiás

RESUMO

A energia fotovoltaica em bombeamento hidráulico para irrigação localizada é reconhecida como uma inovadora solução tecnológica para sistemas agrícolas, visando mitigar os impactos ambientais da agricultura e promover a eficiência energética em ambientes rurais. Devido ao seu potencial significativo para abordar questões energéticas, os estudos sobre essa tecnologia têm ganhado crescente relevância. Este trabalho teve como objetivo realizar um levantamento bibliográfico sobre a integração da energia fotovoltaica em bombeamento hidráulico para promover avanços sustentáveis na irrigação localizada. A adoção da energia fotovoltaica em bombeamento hidráulico é uma opção estratégica para impulsionar a produtividade no setor agrícola e reforçar a sustentabilidade nos sistemas agrícolas. O avanço tecnológico atual possibilita a aplicação da energia fotovoltaica em diversos segmentos econômicos. Décadas de pesquisas evidenciam os benefícios ambientais e a eficiência energética dessa prática, consolidando-a como uma abordagem eficaz para a gestão sustentável da energia.

Palavras-chave: Energias renováveis; Energia fotovoltaica; Irrigação localizada.

ABSTRACT

Photovoltaic energy in hydraulic pumping for localized irrigation is recognized as an innovative technological solution for agricultural systems, aiming to mitigate the environmental impacts of agriculture and promote energy efficiency in rural environments. Due to its significant potential to address energy issues, studies on this technology have gained increasing relevance. This work aimed to carry out a bibliographical survey on the integration of photovoltaic energy in hydraulic pumping to promote sustainable advances in localized irrigation. The adoption of photovoltaic energy in hydraulic pumping is a strategic option to boost productivity in the agricultural sector and reinforce sustainability in agricultural systems. Current technological advances enable the application of photovoltaic energy in various economic segments. Decades of research demonstrate the environmental benefits and energy efficiency of this practice, consolidating it as an effective approach to sustainable energy management.

Keywords: Renewable energies; Photovoltaics; Localized irrigation.

INTRODUÇÃO

Apesar da grande disponibilidade de água e energia no Brasil, o país enfrenta desafios relacionados à gestão desses recursos. A coexistência de situações de abundância e escassez de água, juntamente com questões de eficiência energética, destaca a necessidade de um planejamento mais eficaz. Governos, usuários e a sociedade civil desempenham papéis cruciais na busca por soluções para os conflitos que podem surgir, visando uma gestão sustentável e equilibrada desses recursos essenciais (Fonseca et al., 2020).

Em virtude disso, algumas regiões brasileiras vêm sendo afetadas pela falta de água, o que é uma externalidade negativa quanto ao uso de recursos hídricos em uma determinada região nos mais diversos fins, entre eles a irrigação. Diante disso, o avanço tecnológico é essencial para tornar a agricultura irrigada mais eficiente no uso da água e dos insumos aplicados (Chauhdary et al., 2020).

Com isso a agricultura está em constante atualização, e esse processo acarreta um amplo consumo de energia. Na irrigação, ocorre devido à demanda por motores elétricos ou motores a diesel (Garcia et al., 2019). Para isso, o uso de energias renováveis, vem sendo um mecanismo para a sustentabilidade do setor agrícola, o que permite ser uma alternativa para o bombeamento de água na irrigação (Lowitzsch et al., 2020).

E para melhorar a produção agrícola, a energia solar fotovoltaica é uma fonte importante a ser adotada em diversos setores da produção agrícola, sendo que o sistema pode operar conectado à rede elétrica (on-grid), não conectado ou de forma autônoma (off-grid), e com este último método, destaca-se o bombeamento solar para irrigação, pois pode ser uma alternativa para regiões distantes da rede elétrica (Gorjian et al., 2021).

O setor agrícola, especialmente o agroindustrial, vem incorporando técnicas digitais, robótica e automação associadas à Indústria 4.0, considerada a quarta revolução industrial. Nesse contexto, destaca-se a adoção da agricultura inteligente, estruturada com base nos princípios dessa nova abordagem tecnológica (Mazzetto et al., 2020).

Com isso, surgiram diversos procedimentos voltados à melhoria do desenvolvimento produtivo agrícola, especialmente no que se refere à irrigação. Entre eles, destacam-se o uso de sensoriamento por satélite, redes de sensores, computação em rede, programação, desenvolvimento de aplicativos inteligentes e modelagem computacional (Souza et al., 2019).

A utilização de placas fotovoltaicas em sistemas de irrigação destaca-se como uma alternativa sustentável para o fornecimento de energia no meio agrícola. Nesse contexto, a automação, aliada à modelagem e ao uso de sensores, permite maior eficiência no uso da água e otimização da produção agrícola (Ramadan et al., 2018).

Para isso, a utilização da agricultura inteligente surge como um estilo de gestão que inclui monitoramento, planejamento e controle

inteligentes de processos agrícolas. Esse estilo de gerenciamento requer o uso de uma ampla variedade de sistemas de software e hardware de vários fornecedores (Kruize et al., 2016; Pivoto et al., 2018).

E uma das áreas da ciência que vem sendo utilizada é a eficiência energética por uso solar fotovoltaico, onde o mecanismo permite realizar o bombeamento de recursos hídricos, visando ser aplicado na irrigação agrícola. Com isso as energias consideradas renováveis destacam-se a energia solar, pois a mesma é obtida por meio da radiação solar, uma fonte produtora de energia natural, gratuita e de baixo impacto ambiental (Nascimento; Hausmann, 2015).

No contexto de energias renováveis, a geração de energia solar fotovoltaica (FV) é uma opção de prover auxílio para poder ser utilizada em duas situações: como um facilitador de projetos de bombeamento de água para irrigação agrícola, possuindo assim uma estreita relação com a necessidade de umidade do solo, e também, com relação à microgeração de energia, que dá autonomia ao consumidor final, e distribui a responsabilidade pela suficiência energética de maneira sustentável, uma vez que o sol é fonte ilimitada de energia (GTES, 2014).

Neste sentido, fazer o uso do arranjo fotovoltaico em bombeamento hídrico para sistemas de irrigação, mostra ser uma prática produtiva da energia. O uso da tecnologia fotovoltaica pode aumentar a produtividade ao tornar o uso da água mais eficiente, contribuindo para a melhoria do acesso a esse recurso tanto em quantidade quanto em qualidade. Nesse sentido, em vez de ampliar diretamente a disponibilidade de água, essa tecnologia possibilita um aproveitamento mais racional dos recursos hídricos, permitindo produzir mais com um menor volume de água. Além disso, seu emprego pode favorecer a geração de renda complementar, especialmente em sistemas de produção de hortaliças e frutíferas (Vilela, 2018).

Para reduzir o consumo de energia durante a operação em sistemas de irrigação, pode-se listar algumas medidas como: determinação do diâmetro ótimo da tubulação, após o estudo da rede, levando em conta o critério de energia; administração eficiente conseguida através de protocolos e ferramentas que avaliam o desempenho, usando indicadores de gestão (Jiménez-Bello et al., 2011).

Com a nova “agricultura de precisão”, as informações coletadas podem ser armazenadas em um cartão e transferidas para um computador doméstico. A partir disso, os agricultores conseguem combinar esses dados com informações de rendimento, previsões meteorológicas e análises do solo para criar planilhas e simulações de sistemas agrícolas. Essas ferramentas permitem uma eficiência ainda maior na produção de alimentos (GREAT ACHIEVEMENTS, 2022).

Atualmente, a inclusão de pesquisas na área vem impulsionando o desenvolvimento de sistemas automatizados, os quais possibilitam um manejo mais eficiente dos recursos hídricos. Nesse contexto, agricultores têm buscado novas alternativas para aumentar a eficiência energética e otimizar o uso da água.

Assim, a automação e a modelagem computacional vêm se tornando uma grande tendência no setor produtivo agrícola, no qual, se têm a necessidade de desenvolver equipamentos e mecanismos cada vez mais precisos e de baixo custo. Sendo, que esses mecanismos de modelagem promovem grandes benefícios a sistemas de irrigação, permitindo o gerenciamento efetivo no campo.

As ações como verificação em sistemas tubulares, pode ser feita através de dispositivos inteligentes, sendo uma forma adequada no manejo de água e solo, influenciando assim no sucesso do estabelecimento de uma cultura.

Os profissionais da área devem manter-se atualizados e em sintonias com as evoluções dos postos de trabalho, e ao setor produtivo, sendo que para isso é necessário o entendimento do uso da modelagem computacional, no qual ela irá complementar na construção e avaliação do desempenho de sistemas de irrigação, antes mesmo dele existir, promovendo assim uma simulação do processo de desenvolvimento do projeto.

Atualmente existem diversos programas ou aplicativos que fazem modelagem computacional. Sendo assim, torna-se necessário implementar pesquisas relacionadas à modelagem matemática e implementação computacional para sistema de irrigação localizada, a fim de analisar o desempenho e precisão do sistema em ambientes agricultáveis.

A irrigação localizada, por meio de emissores sob pressão, permite a aplicação de água diretamente na zona radicular das culturas, com pequenas vazões, baixa pressão e alta frequência, promovendo maior eficiência no uso da água (Danole; Patil, 2015; Frizzzone, 2017). Nesse sentido, quando associada a sistemas de bombeamento hidráulico alimentados por energia fotovoltaica, essa tecnologia torna-se ainda mais sustentável, pois reduz o consumo de energia convencional e viabiliza o uso da irrigação em áreas com limitada infraestrutura elétrica.

Assim, o objetivo do presente trabalho foi o de realizar um levantamento bibliográfico sobre a integração da energia fotovoltaica em bombeamento fotovoltaico para promover avanços sustentáveis na irrigação localizada.

RADIAÇÃO SOLAR

O processo mais importante pela transferência de energia na atmosfera ocorre através da radiação eletromagnética, com isso, a radiação solar é uma fonte praticamente inesgotável de energia limpa, não poluente, capaz de sustentar a vida na terra, além de ser uma alternativa às fontes atuais de energia (Antunes Júnior et al., 2017).

O estudo da radiação solar torna-se fundamental para a utilização apropriada das tecnologias solares, obtendo-se assim, o melhor rendimento dos sistemas de geração fotovoltaica. Conhecer o potencial energético solar de uma região é importante para possibilitar o melhor aproveitamento desse recurso (Domingos et al., 2020).

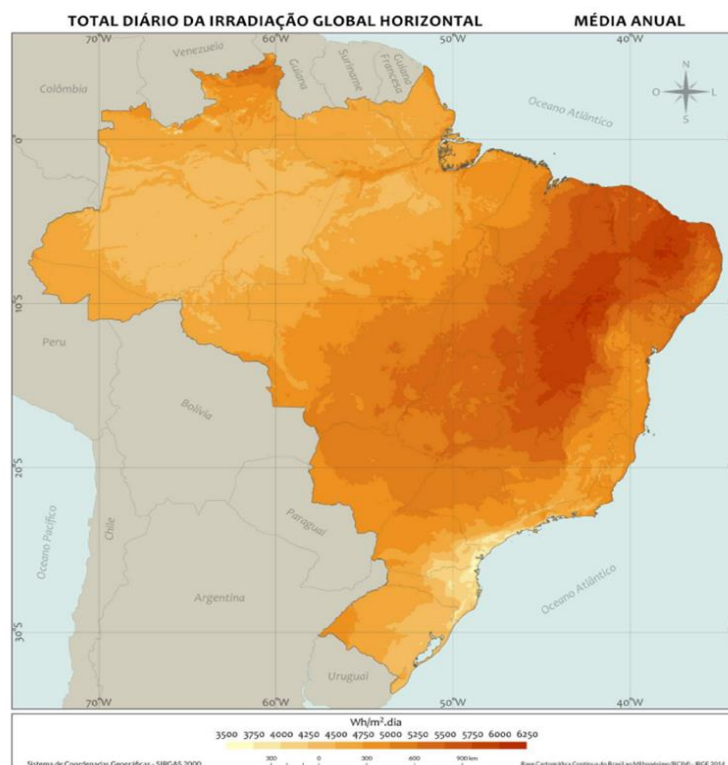
Com isso, a conversão da energia solar em energia elétrica é realizada por meio da incidência da radiação solar nas células fotovoltaicas que, por sua vez, fazem parte do módulo fotovoltaico. A produção de eletricidade a partir dos sistemas fotovoltaicos consiste na conversão direta da radiação eletromagnética do sol em energia elétrica por meio da criação de uma diferença de potencial elétrica sobre uma célula fotovoltaica fabricada a partir de material semicondutor, sendo que a medida de irradiância é dada em W/m^2 , no qual é possível avaliar a eficiência dos dispositivos e sistemas fotovoltaicos, em que o valor padrão de 1000 W/m^2 as eficiências das células e módulos fotovoltaicos de diversos fabricantes podem ser especificadas e comparadas com base numa condição padronizada de irradiância solar (Villalva, 2015).

Dessa forma, o efeito fotovoltaico proveniente da radiação solar, a célula produz uma corrente elétrica que, sob determinadas condições, é proporcional à intensidade da radiação incidente (Rosso et al., 2020).

A figura 01 mostra o território brasileiro. O Brasil, por estar localizado próximo à linha do Equador, apresenta alto potencial de aproveitamento da energia solar. O Atlas Brasileiro de Energia Solar (2017) também apresenta o mapa de distribuição da média anual típica da radiação solar global diária no plano horizontal.

O aproveitamento do potencial solar brasileiro é uma oportunidade para impulsionar a transição para fontes de energia mais limpas e sustentáveis, contribuindo para a mitigação das mudanças climáticas e para a segurança energética do país.

Figura 01 – Mapa de Irradiação Solar Global no Brasil – kWh/m^2



Fonte: Atlas Brasileiro de Energia Solar (2017).

Diante disso é necessário verificar a disponibilidade do recurso solar na área de interesse, pois a quantidade de energia produzida por um sistema fotovoltaico depende da irradiação solar no local onde é instalado (Villalva, 2015).

Um gerador fotovoltaico por exemplo, tem suas características elétricas dependentes basicamente da irradiância e da temperatura nos módulos, sendo a influência da irradiância solar muito mais significativa do que a da temperatura, pois pode variar significativamente em curtos intervalos de tempo (Pinho; Galdino, 2014). Para isso, podem ser utilizados modelos matemáticos para se estimar a irradiação solar, ferramentas computacionais, dados de estações solarimétricas ou outros bancos de dados de irradiação solar.

SISTEMA FOTOVOLTAICO

Um sistema fotovoltaico é uma tecnologia que converte a luz solar em energia elétrica por meio de células fotovoltaicas. Essas células, geralmente feitas de silício, geram corrente contínua quando expostas à luz solar. O sistema é composto por painéis solares, inversor solar, estrutura de montagem, cabeamento e dispositivos de proteção.

Os painéis capturam a luz solar e a convertem em eletricidade, que é então transformada em corrente alternada pelo inversor, tornando-a utilizável para alimentar equipamentos elétricos. Os sistemas fotovoltaicos são uma fonte de energia renovável, contribuindo para a redução das emissões de gases de efeito estufa e para a independência energética de residências, empresas e indústrias. Quanto a sua estrutura pode estar configurado da seguinte forma:

1. **Arranjo Fotovoltaico** - converter irradiação, a energia dos fótons incidentes, em energia elétrica através do efeito fotoelétrico. O arranjo FV é composto por conexão série-paralela de módulos FV, os quais, por sua vez, são compostos por várias células FV conectadas em série ou paralelo. A sua geração depende, principalmente, da irradiância incidente (G) e a temperatura da célula (T).
2. **Conversor CC-CC** - conversor CC-CC desempenha duas funções cruciais em sistemas fotovoltaicos (FV): o controle do ponto de máxima potência (MPPT) e a regulação da tensão no elo CC. Este componente é considerado opcional e sua presença determina a classificação do sistema FV. Quando o conversor CC-CC está presente, o sistema é classificado como estágio duplo, sendo geralmente utilizado quando há necessidade de fluxo bidirecional de energia. Por outro lado, quando o conversor não está incluído, o sistema é classificado como estágio único, e nesse caso, a função de MPPT é realizada pelo próprio inversor. Essa distinção oferece flexibilidade na concepção e implementação de sistemas fotovoltaicos, permitindo adaptá-los de acordo com as

especificidades e exigências de cada aplicação (BLAABJERG; IONEL, 2017).

3. Inversor - O inversor é um componente essencial em sistemas fotovoltaicos, sendo responsável por converter a energia elétrica gerada pelos painéis solares, que está na forma de corrente contínua (CC), em corrente alternada (CA), para ser injetada na rede elétrica. Ele desempenha o papel de um conversor CC-CA. Além disso, em sistemas fotovoltaicos de estágio único, o inversor pode também realizar o controle do ponto de máxima potência (MPPT), ajustando a operação dos painéis solares para maximizar a eficiência de geração de energia. Essa funcionalidade torna o inversor um componente versátil e fundamental na operação eficiente de sistemas fotovoltaicos.

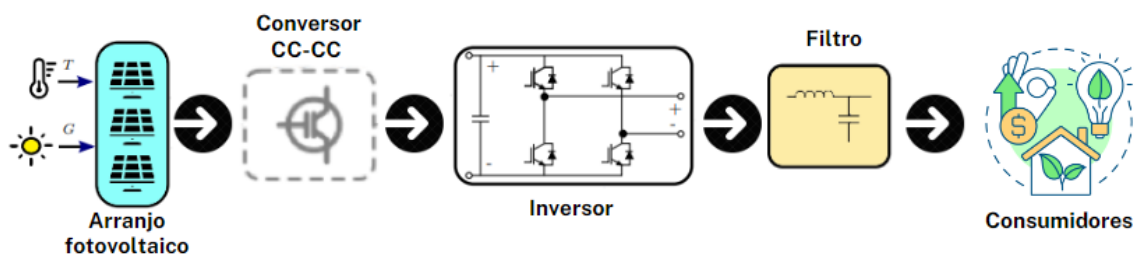
4. Filtro passa-baixa - desempenha um papel fundamental na conversão de energia em sistemas fotovoltaicos, garantindo a qualidade da energia elétrica gerada e otimizando o desempenho do sistema como um todo.

5. Consumidores - São os dispositivos ou aparelhos que consomem a eletricidade gerada pelo sistema fotovoltaico, como eletrodomésticos, equipamentos eletrônicos, iluminação, sistemas de irrigação e entre outros.

Esses componentes trabalham juntos para capturar a energia solar, convertê-la em eletricidade utilizável e alimentar os dispositivos elétricos em uma residência, empresa ou sistemas de irrigação agrícola ou outro local. O arranjo fotovoltaico pode ser dimensionado de acordo com as necessidades de consumo de energia do local e as condições ambientais específicas.

A figura 02 abaixo representa uma estrutura básica de um arranjo fotovoltaico.

Figura 02 - Estrutura de um arranjo fotovoltaico.



Fonte: Autor (2026).

Um arranjo fotovoltaico refere-se à configuração física na qual os painéis solares fotovoltaicos são instalados para gerar eletricidade a partir da luz solar. Esses são os principais componentes de um arranjo fotovoltaico típico. O tamanho e a complexidade do arranjo podem variar

dependendo da escala do projeto e das necessidades específicas de energia do local onde vai ser instalado.

SISTEMA FOTOVOLTAICO DE BOMBEAMENTO DE ÁGUA

As fontes renováveis de eletricidade representam uma ferramenta fundamental para os países em desenvolvimento e estão se mostrando uma alternativa promissora para mitigar os efeitos negativos do não acesso à eletricidade (NATIONS, 2016).

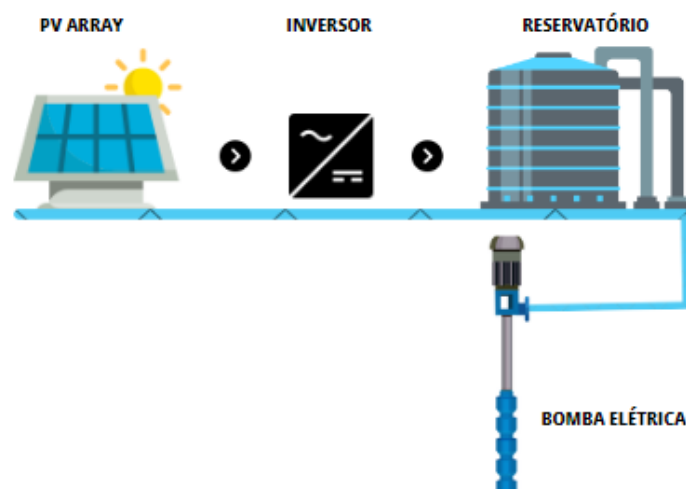
Com isso, sistema fotovoltaico (FV) de bombeamento de água é um sistema que consiste no transporte de água da sua fonte natural para o ponto de uso baseado de um sistema composto por módulos fotovoltaicos, conversor de frequência para o fluxo de potência, e uma motobomba, sendo que os módulos fotovoltaicos são conectados a um conversor (CC-CC ou CC-CA), no qual é responsável pela alimentação da motobomba que converte a energia elétrica em energia potencial hidráulica (Mergoul et al., 2018).

Devido ao impacto negativo de combustíveis fósseis ao meio ambiente, o uso de energia renovável tem sido utilizado como energia limpa a partir de fontes da natureza, sendo que a energia solar tem recebido cada vez mais atenção, devido às suas diversas vantagens.

Com isso, vêm se tornando popular e competitivo o uso de fontes convencionais de energia para diversas aplicações, especialmente no sistema fotovoltaico de bombeamento hídrico. O bombeamento fotovoltaico em si, visa bombear recurso hídrico, seja de rios, lagos ou poços, sendo que o mesmo produz sua própria eletricidade, o que necessita de pouca manutenção e promove soluções no que se refere à eficiência energética.

O acionamento e configuração do arranjo de bombeamento de água fotovoltaica é similar a dispositivos convencionais, sendo que o mesmo se difere no ponto de operação do motor da bomba, no qual é realizado pelo sistema de módulos fotovoltaicos. A figura 03 abaixo mostra um diagrama de bombeamento de água com energia solar fotovoltaica.

Figura 03 – Configuração de um sistema de bombeamento de água com energia solar fotovoltaica.



Fonte: Autor (2026).

Entre as fontes de energia renováveis pode-se destacar a energia solar fotovoltaica, pelo efeito fotovoltaico, que é a conversão direta da luz em eletricidade com o auxílio de células fotovoltaicas constituídas de silício (Melo, 2020).

Os sistemas fotovoltaicos de bombeamento de água convertem a energia solar em energia elétrica para alimentar a bomba d'água. A tecnologia de bombeamento solar de água pode ser considerada uma alternativa promissora aos sistemas de bombeamento à base de eletricidade, diesel ou gasolina, pois são econômicos e ecológicos (Camargo; Ribeiro; Nahur, 2015).

Apesar das vantagens associadas à energia fotovoltaica, essa fonte apresenta limitações significativas, sobretudo em razão de sua natureza intermitente. Isso pode afetar o desempenho do sistema de bombeamento de água. Portanto, é necessária uma previsão precisa da potência fotovoltaica. A energia fotovoltaica depende principalmente da temperatura ambiente e da irradiação solar (Elnozahy; Salama, 2013).

Dessa forma, a previsão da geração de energia fotovoltaica pode ser realizada a partir de dados meteorológicos. Huang et al. (2015) propõem um modelo matemático simplificado para sistemas fotovoltaicos, baseado na relação entre a irradiância solar, a área do módulo e a eficiência dependente da temperatura. Nesse contexto, a potência elétrica gerada pelo arranjo fotovoltaico pode ser expressa por:

$$P_{pv} = G.A.\eta(T_c)$$

em que P_{pv} representa a potência gerada (W), G a irradiância solar incidente no plano do módulo (W/m^2), A a área efetiva do painel (m^2) e $\eta(T_c)$ a eficiência do módulo fotovoltaico em função da temperatura da célula.

A eficiência do sistema é geralmente ajustada para considerar perdas térmicas, sendo expressa por:

$$\eta(T_c) = \eta_{ref}[1 - \beta(T_c - T_{ref})]$$

onde η_{ref} é a eficiência em condições padrão de teste (STC), β é o coeficiente de temperatura do módulo ($^{\circ}\text{C}^{-1}$), T_c é a temperatura da célula fotovoltaica e T_{ref} corresponde à temperatura de referência (25°C). Substituindo a expressão de eficiência na equação da potência, obtém-se o modelo final utilizado para estimativa da geração:

$$P_{pv} = G.A.\eta_{ref}[1 - \beta(T_c - 25)]$$

Dessa forma, o modelo permite estimar a potência fotovoltaica a partir de variáveis meteorológicas observáveis, como irradiância e temperatura ambiente, sendo amplamente aplicado em estudos de previsão de geração energética devido à sua simplicidade e boa representatividade do comportamento físico do sistema.

O gerador solar somente gera energia quando há radiação solar incidindo nas placas. Como comumente não há baterias, a motobomba só

funciona durante o dia, quando há insolação. Não bombeia em períodos nublados, chuvosos. A quantidade de água que bombeia depende também da posição do Sol em relação às placas. Quando o dia está claro e sem nuvens a vazão bombeada é máxima próxima ao meio-dia, quando o Sol está a pino. No início da manhã e no final da tarde pouca água é bombeada. Portanto a quantidade instantânea de água bombeada varia de acordo com o nível de insolação naquele momento. O bombeamento na capacidade máxima só ocorre durante alguns poucos momentos do dia. Por isso normalmente a presença de um reservatório de água com volume adequado é normalmente necessária. E é também por isso que se especifica a capacidade do sistema de bombeamento solar em m^3 (ou litros) por dia e não m^3 (ou litros) por hora como nos sistemas convencionais.

O arranjo gerador fotovoltaico (FV) e motor de corrente alternada (CA), é formado pela associação dos módulos FV, conectado a uma unidade de condicionamento de energia que é compreendida por um conversor CC/CA, acoplado a um conjunto motor-bomba composto por um motor de indução CA e algum tipo de bomba centrífuga.

O uso da modelagem visa melhorar a compreensão do comportamento dos seus principais parâmetros de dados de calibração. No qual podemos mencionar um sistema fotovoltaico de bombeamento de água e seus elementos de conversão, onde pode-se destacar a radiação solar (G) e a temperatura (T), sendo que o elemento responsável pela conversão do domínio elétrico é o arranjo fotovoltaico, nesse sentido tem como variáveis a corrente (I_{pv}) e tensão fotovoltaicas (V_{pv}). Enquanto ao conversor de frequência, visa a conversão de corrente contínua (CC) para corrente alternada (CA), sendo que seus parâmetros de saída se baseiam em corrente (I_{ac}) e tensões trifásicas (V_{ac}), ou seja, as mesmas irão alimentar o motor de indução de corrente alternada (CA). Neste sentido o motor de indução visa converter energia elétrica para mecânica rotacional, o que irá promover na sua saída torque mecânico (C) e velocidade rotacional (n). Essas informações contidas através da bomba centrífuga, vão ser transformadas em vazão (Q) e pressão hidráulica (P), sendo que a principal finalidade de aplicação é utilizar energia hídrica para irrigação de plantios agrícolas.

Neste sentido, o uso e aplicação de fontes renováveis de energia vem se destacando de forma significativa, entre elas a fotovoltaica com grande participação, pois a mesma permite a conversão direta de radiação solar em energia elétrica, por meio de células fotovoltaicas.

TECNOLOGIA DE MANEJO HÍDRICO

No Brasil está acontecendo grandes transformações no que se refere ao uso de tecnologias aplicadas à agricultura e principalmente após a evolução de técnicas ocorridas em meados de 1960 e 1970, em um processo conhecido como Revolução Verde (BECKMAN; SANTA, 2019).

Com isso, a produção agrícola brasileira vem se destacando devido à demanda do progresso tecnológico, principalmente no que se refere à disponibilidade de sistemas eficientes de energia renovável, como a utilização de células fotovoltaicas, para o aumento da produtividade da terra e de produtos do setor primário (Gelatti et al., 2020).

Logo, o uso de recursos hídricos, em termos quantitativos, é de suma importância para a vida dos seres vivos e para as atividades antrópicas como produção de alimentos, geração de energia, saneamento domiciliar, dentre outros (Oliveira et al., 2015). A irrigação é uma importante ferramenta em áreas com longos períodos secos, o qual cria estresse e reduz o rendimento e a longevidade das culturas locais (Scarpore et al., 2015).

Na área agrícola, tanto para a irrigação quanto para o abastecimento de água, faz-se necessário a inserção de sistemas de bombeamento de forma a reduzir a dependência de chuvas, sendo uma tecnologia diversificada para sistemas produtivos agrícolas (Chandel; Naik; Chandel, 2017).

Uma grande resposta em fazendas agrícolas isoladas é a inserção de bombas de água alimentadas por gerações renováveis autônomas. Para agricultores pequenos, o uso de bombeamento fotovoltaicos vem sendo uma boa opção, em termos de manutenção e custo, quando se comparado a sistemas convencionais para fornecimento de energia ou geradores a diesel, sendo que sistemas de bombeamento fotovoltaico não dependem de infraestrutura elétrica para sua transmissão (Chandel; Naik; Chandel, 2015).

Em sistemas de bombeamento solar fotovoltaico, existem duas principais tipologias de motores: CC e CA. Os motores de corrente contínua são alimentados diretamente pelos painéis solares, dispensando inversores e sendo indicados para baixas potências (até 2 kW). Já os motores de corrente alternada necessitam de inversor CC-CA, operam por indução trifásica e são mais adequados para médias e altas potências (acima de 2 kW). A primeira tipologia possui vantagens devido a sua facilidade de instalação e menor quantidade de módulos associados, no entanto seu custo de manutenção é maior. Já motores CC, é uma tecnologia importada e exige bastante a substituição de escovas. Nesse sentido, trabalha-se com sistemas de motores de indução CA como alternativa de bombeamento. Para a instalação de uma unidade de condicionamento de energia é necessário realizar a conversão CC-CA, possibilitando a alimentação das bombas CA por fonte solar fotovoltaica (Campos; 2020).

Dessa forma, o uso de tecnologias de manejo hídrico com sistemas de bombeamento solar fotovoltaico se apresenta como uma alternativa eficiente e sustentável para a agricultura. Além de reduzir custos e a dependência de energia convencional, essas soluções favorecem o uso racional da água e aumentam a autonomia produtiva, especialmente em regiões isoladas.

MÉTODOS E SISTEMAS DE IRRIGAÇÃO

O uso de recursos hídricos de maneira geral, a irrigação é o segmento que mais consome água. O consumo de água para irrigação pode ficar em torno de até 70% do total utilizado, dependendo da região. A fim de otimizar o uso desse recurso, deve-se melhorar a eficiência da aplicação. Para isso existem dispositivos reguladores, que em cada caso

devem possuir qualidade compatível com o objetivo esperado (Dalri et al, 2015).

Existem quatro métodos de irrigação: aspersão, localizada, superfície e subterrânea, estes são a forma como a água chega até a cultura, sendo a irrigação por aspersão e a localizada métodos de irrigação pressurizada (Frizzone; 2017). Abaixo são apresentadas as principais características de sistemas de irrigação para ambientes agricultáveis:

Tabela 01 - Sistemas de irrigação para ambientes agricultáveis.

Métodos de Irrigação	Vantagens	Desvantagens
Irrigação por aspersão	- Uniformidade na distribuição de água; - Automatização; - Flexibilidade; - Redução de problemas de erosão; - Menor risco de danos às plantas.	- Perda de água por evaporação; - Custo inicial e manutenção; - Uso de energia; - Possíveis problemas de uniformidade; - Resíduos de sais
Micro Irrigação, ou irrigação localizada	- Eficiência no uso da água; - Economia de água; - Redução do crescimento de ervas daninhas; - Menor risco de doenças foliares; - Flexibilidade.	- Custo inicial; - Entupimento dos emissores; - Possível salinização do solo; - Dependência de energia; - Exigência de manutenção.
Irrigação por superfície	- Baixo custo inicial; - Simplicidade; - Adaptabilidade a diferentes tipos de solo; - Baixo consumo de energia; - Redução do risco de erosão.	- Baixa eficiência no uso da água; - Dificuldade em alcançar uniformidade; - Limitações na aplicação de fertilizantes; - Susceptibilidade a perdas de água devido à evaporação; - Limitações na aplicação de água em culturas específicas.
Irrigação subterrânea	- Eficiência no uso da água; - Redução do crescimento de ervas daninhas; - Conservação do solo; - Menor risco de doenças foliares;	- Custo inicial mais elevado; - Complexidade de instalação e manutenção; - Possíveis obstruções nos tubos; - Difícil monitoramento

- Menor consumo de energia;	e ajuste; - Potencial de salinização do solo.
-----------------------------	--

Fonte: Frizzzone (2017).

Como se observa, a irrigação por aspersão e a microirrigação são métodos pressurizados e a irrigação por superfície e a subterrânea são métodos não pressurizados. O processo de seleção do método de irrigação deve ser baseado em uma criteriosa análise das condições presentes, em função das exigências de cada sistema de irrigação (Frizzzone, 2017).

A escolha do método de irrigação depende das características específicas de cada área de cultivo, visando otimizar o uso da água e garantir o crescimento saudável das plantas. Muitas vezes, sistemas de irrigação modernos incorporam tecnologias avançadas para maximizar a eficiência e reduzir o desperdício de água.

BOMBAS HIDRÁULICAS

As bombas de modo geral são dispositivos capazes de realizar o deslocamento de fluídos através do acionamento do motor, transferindo energia cinética do eixo de interligação com o motor para o fluido, aumentando sua pressão ou velocidade (Morales, 2011). Abaixo são apresentadas algumas principais características de bombas do tipo:

(a) Bombas centrífugas - Mecanismo mais utilizado no bombeamento de água, seu funcionamento consiste em um eixo dotado de hélices que giram criando uma força centrífuga, onde surge o que chamamos de zona de baixa pressão em seu centro de rotação (entrada de água) e uma zona de alta pressão nas extremidades (descarga de água), suas operações são indicadas para grandes vazões e em pequenas alturas manométricas.

(b) Bombas volumétricas - Mecanismo cujo funcionamento acontece por meio de repetidos movimentos de admissão de fluidos por uma cavidade e compressão da mesma por uma saída. São indicadas para alcançar grandes alturas manométricas com volumes pequenos e moderados de fluido.

(c) Bombas de engrenagens - Mecanismo de bombeamento composto por duas engrenagens, sendo que a bomba consiste basicamente de uma carcaça com orifícios de entrada e de saída. Suas operações são indicadas em várias áreas, entre elas o setor agropecuário.

(d) Bombas de palheta - Mecanismo no qual a ação de bombeamento, acontece por meios de palhetas, em que acompanha o contorno de um anel ou carcaça. Seu acoplamento geralmente acontece por máquinas de fundição, usinagem, injetoras plásticas utilizadas em construções e outras aplicações.

(e) Bombas de pistão - Dispositivo no qual sua ação é o bombeamento, em que os pistões têm a funcionalidade de alternância dentro do tambor cilíndrico, sendo que suas aplicações podem ser inseridas no setor agrícola, pois a mesma executa o bombeamento de água ou simplesmente pulverizar inseticida nos campos.

As bombas hidráulicas são amplamente utilizadas em diversas aplicações, incluindo abastecimento de água em fazendas, sistemas de

irrigação agrícola, indústria do segmento agrícola, sistemas de refrigeração, sistemas de controle de processos industriais, entre outros. Essas aplicações destacam a versatilidade e a importância das bombas hidráulicas em vários setores da economia, contribuindo para o funcionamento eficiente de muitos processos e sistemas essenciais.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A energia fotovoltaica em bombeamento hidráulico para irrigação localizada emerge como uma solução tecnológica promissora e inovadora para os sistemas agrícolas contemporâneos. Esta tecnologia não apenas visa mitigar os impactos ambientais associados à agricultura convencional, mas também promove a eficiência energética, contribuindo para um desenvolvimento mais sustentável em ambientes rurais.

A crescente relevância dos estudos sobre a integração da energia fotovoltaica em bombeamento hidráulico demonstra o reconhecimento do seu potencial significativo para abordar questões energéticas emergentes, consolidando-a como uma opção estratégica para impulsionar a produtividade no setor agrícola e reforçar a sustentabilidade nos sistemas agrícolas.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). Energia Solar. **Atlas da Energia Elétrica do Brasil**, p. 14, 2017.

ATLAS BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR, INPE (**Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais**), 2017. Disponível em: <http://labren.ccst.inpe.br/>. Acesso em: 07 dez. 2023.

BECKMAN, E., SANTANA AC Modernização da agricultura na nova fronteira agrícola do Brasil: MAPITOBA e Sudeste do Pará. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, Maringá-PR, v. 12, n. 1, pág. 81-102, 2019.

BLAABJERG, F.; IONEL, D. M. (ed.). **Renewable Energy Devices and Systems with Simulations in MATLAB and ANSYS**. [S.l.: s.n.]: CRC, 2017.

CAMARGO, FERNANDO; RIBEIRO, LIGIA PITTA; NAHUR, André Costa. Desafios e Oportunidades para a energia solar fotovoltaica no Brasil: recomendações para políticas públicas. **Brasília: WWF-Brasil**, 2015.

CENTRO DE REFERÊNCIA PARA ENERGIA SOLAR E EÓLICA SÉRGIO BRITO - CRESESB. **Potencial Solar - SunData v 3.0**. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=sundata>. Acesso em: 23 set. 2023.

CHANDEL, S.S.; NAIK, M.N.; CHANDEL, R. Review of performance studies of direct coupled photovoltaic water pumping systems and case study. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 76, p. 163-175, 2017.

CHANDEL, S.S.; NAIK, M.N.; CHANDEL, R. Review of solar photovoltaic water pumping system technology for irrigation and community drinking water supplies. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 49, p. 1084-1099, 2015.

CAMPOS, L. C. C. **Motor de Indução com Conversor de Frequência Convencional Acoplado em Sistema Fotovoltaico Off-Grid para Irrigação**, Rio Verde. 2020.

CHAUHDARY, J. N. et al. Impact assessment of precision agriculture and optimization of fertigation for corn growth. **Pakistan Journal of Agricultural Sciences**, v. 57, n. 4, p. 993- 1001, 2020.

DALRI, A. B., GARCIA, C. J. B., ZANINI, J. R., FARIA, R. T. D., & PALARETTI, L. F. **Caracterização técnica e desempenho hidráulico de quatro gotejadores autocompensantes utilizados no Brasil**. *Ciência rural*, v. 45, n. 8, p. 1439-1444, 2015.

DANOLE, A. S; PATIL, B. M. Evaluation of local head loss for non pressure compensation online emitters and pressure compensating inline emitters in drip irrigation laterals. **International Journal of Emerging Research in Management & Technology**, v. 4, p. 9-16, 2015.

DE OLIVEIRA, L. B., KOETZ, L. C. E., PÉRICO, E., MAZZARINO, J. M., & GRAVE, M. T. Q. (2015). Gerenciamento comunitário de recursos hídricos, uma questão de saúde: a água que temos e a água que queremos: percepção dos usuários de sociedades de água em um município rural da sub-bacia hidrográfica de Forqueta, RS. **Ambiência**, Guarapuava, v. 11, n. 2, p.359-374, Abr. 2015.

DOMINGOS, S. F., MONTEIRO, L. G., BOAVENTURA, W. C. Estado da Arte para Previsão da Radiação Solar. **VIII CBENS**. Fortaleza. 2020.

ELNOZAHY, M. S.; SALAMA, M. M. A. Technical impacts of grid-connected photovoltaic systems on electrical networks—A review. **Journal of Renewable and Sustainable Energy**, v. 5, n. 3, p. 032702, 2013.

FONSECA, E. R., DE ÁVILA MODESTO, F., CARNEIRO, G. C. A., LIMA, N. F. S., & DE ALMEIDA MONTE-MOR, R. C. Conflitos pelo uso da água na Bacia Hidrográfica do rio São Francisco-Estudos de caso no Estado da Bahia. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 9, p. e823997929-e823997929, 2020.

FRIZZONE, J. A. **Os métodos de irrigação**. Departamento de Engenharia de Biosistemas, ESALQ/USP, 2017. Disponível em: http://www.leb.esalq.usp.br/leb/disciplinas/Frizzone/LEB_1571/TEXTOS_COMPLEMENTAR_1_-_METODOS_DE_IRRIGACAO.pdf. Acesso em: 25 abr. 2023.

FRIZZONE, J. A. **OS MÉTODOS DE IRRIGAÇÃO**. Piracicaba: Esalq - Usp, 2017. 32 slides, color.

GARCIA, AM; GALLAGHER, J.; MCNABOLA, A.; POYATO, EC; BARRIOS, PM; DÍAZ, JR. Comparando os impactos ambientais e econômicos da energia solar fotovoltaica on ou off-grid com fontes de energia tradicionais para sistemas de irrigação rural. **Energia Renovável**, v.140, p.895-904, 2019.

GARCIA, C. **Modelagem e Simulação**, São Paulo: EDUSP, 1997.

GELATTI, E.; BOBATO, AM; FREITAS, CA de; ZANIN, V.; CORONEL, DA Caracterização espacial da modernização dos municípios do estado do Rio Grande do Sul (2010 e 2017). **Desenvolvimento Regional em Debate**, v. 10, p. 1079-1103, 2020.

GORJIAN, S.; CALISE, F.; KANT, K.; AHAMED, MS; COPTARO, B.; NAJAFI, G.; ZHANG, X.; AGHAEI, M.; SHAMSHIRI, RR Uma revisão sobre oportunidades para implementação de tecnologias de energia solar em estufas agrícolas. **Journal of Cleaner Production**, v.285, p.1-30, 2021.

GREAT ACHIEVEMENTS. **Agricultural Mechanization Timeline**. Disponível em: <http://www.greatachievements.org/?id=3725>. Acesso em 12 julho. 2022.

GTES (Grupo de Trabalho de Energia Solar). **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. CEPEL – DTE – CRESESB, Rio de Janeiro, 2014.

HUANG, C. M., CHEN, S. J., YANG, S. P., & KUO, C. J. **One-day-ahead hourly forecasting for photovoltaic power generation using an intelligent method with weather-based forecasting models**. **IET Generation, Transmission & Distribution**, v. 9, n. 14, p. 1874-1882, 2015.

JIMÉNEZ-BELLO, M. Á., ALZAMORA, F. M., CASTEL, J. R., INTRIGLIOLO, D. S. *Validation of a methodology for grouping intakes of pressurized irrigation networks into sectors to minimize energy consumption*. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, n.102, p. 46-53, 2011.

JÚNIOR, E. A., CASAROLI, D., JUNIOR, J. A., & EVANGELISTA, A. W. P. **Ajuste dos parâmetros da equação de Angstrom-Prescott na estimativa da radiação global em municípios goianos**. In: CONGRESSO NACIONAL DE IRRIGAÇÃO E DRENAGEM, 2017.

KRUIZE, J. W., WOLFERT, J., SCHOLTEN, H., VERDOUW, C. N., KASSAHUN, A., & BEULENS, A. J. (2016). A reference architecture for Farm Software Ecosystems. **Computers and Electronics in Agriculture**, 125, 12 - 28.

LOWITZSCH, J.; HOICKA, CE; VAN TULDER, FJ. Comunidades de energia renovável sob o modelo de Governança do Pacote Europeu de Energia Limpa de 2019 para os clusters de energia do futuro? **Revisões de energia renovável e sustentável**, v.122, p.1-13, 2020.

MAZZETTO, F.; GALO, R.; SACCO, P. Reflexões e Propostas Metodológicas para Tratar o Conceito de “Precisão da Informação” em Práticas Agrícolas Inteligentes. **Sensores**, v. 20, p. 1-27, 2020.

MELO, F, C. **Análise de viabilidade técnica e econômica de um projeto fotovoltaico**. Estudo de caso: Estádio Aderbal Ramos da Silva. Universidade Federal de Santa Catarina Campus Florianópolis. Florianópolis-SC. 2020.

MERGOUL, KHALID; LAARABI, BOUCHRA; BARHDADI, ABDEL FETTAH. Solar water pumping applications in Morocco: State of the art. In: **2018 6th International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC)**. IEEE, 2018. p. 1-6.

MORALES, LUIS ROBERTO VALER. **A utilização de sistemas fotovoltaicos de bombeamento para irrigação em pequenas propriedades rurais**. 2011. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo.

NASCIMENTO, R. L; HAUSMANN, R. Sistema de bombeamento de água pluvial com estudo da viabilidade da utilização de energia solar fotovoltaica. **Revista E-Tech: Tecnologias para Competitividade Industrial-ISSN1983-1838**, v. 8, n. 2, p. 85-110, 2015.

NATIONS, UNITED. **The Sustainable Development Goals 2016**. eSocialSciences, 2016.

PINHO, J. T.; GALDINO. M. A. **Manual de Engenharia Para Sistemas Fotovoltaicos**. CEPEL – CRESESB, Rio de Janeiro, 2014.

PIVOTO, D., WAQUIL, P. D., TALAMINI, E., FINOCCHIO, C. P. S., DALLA CORTE, V. F., & DE VARGAS MORES, G. (2018). Scientific development of smart farming technologies and their application in Brazil. **Information processing in agriculture**, 5 (1), 21 - 32.

RAMADAN, KHALED MOHAMED; OATES, MARTIN JOHN; MOLINA-MARTINEZ, JOSÉ MIGUEL; RUIZ-CANALES, Antonio. **Design and implementation of a low cost photovoltaic soil moisture monitoring station for irrigation scheduling with different frequency domain analysis probe structures**. Computers and Electronics in Agriculture, v.148, p. 148-159, 2018.

ROSSO, A. P., LUDKE, M. C., CROTTI, P., RAMPINELLI, G. A., MARCELINO, R. Desenvolvimento de protótipos de módulos de referência para medição de radiação solar. **VII CBENS**. Gramado. 2020.

SCARPARE, F.V.; LEAL, M.R.L.V.; VICTORIA, R.L. The challenges of sugarcane ethanol in Brazil: past, present and future. In: DALLEMAND, J.F.; HILBERT, J.A.; MONFORTI, F. Bioenergy and Latin America: **A Multi-Country Perspective**. JRC technical reports, 2015, p.91-104.

SOLAR BRASIL. **Bombeamento de água com energia solar fotovoltaica**. Disponível em: <https://www.solarbrasil.com.br/energia-solar/>. Acesso em: 01 jul. 2023.

SOUZA, C. F.; CONCHESQUI, M. E. S.; SILVA, M. B. Semiautomatic irrigation management in tomato. **Engenharia Agrícola**, v. 39, n. esp, p. 118-125, 2019.

VILELA, V. L. D. **Qualidade da água de mananciais empregados na irrigação e lavagem de hortaliças da região de Apucarana, Paraná.** 2018. Dissertação de Mestrado. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

VILLALVA, M. G. **Energia Solar Fotovoltaica: Conceitos e Aplicações;** Segunda Edição. **São Paulo. Editora Érica.** p. 224, 2015.

Contato dos autores/as:

Autor: Ricardo Aparecido Santos

e-mail: ricardoaparecidosantos355@gmail.com

Autor: João Areis Ferreira Barbosa Júnior

e-mail: joao.areis@ifgoiano.edu.br

Autora: Andréa dos Guimarães de Carvalho

e-mail: andrea.cenaudio@gmail.com

Manuscrito aprovado para publicação em: 25/04/2026.