

CAPÍTULO 19

19 UTILIZAÇÃO DA ENERGIA FOTOVOLTAICA PARA IRRIGAÇÃO: PASSADO, PRESENTE E FUTURO

Flávio Gonçalves Oliveira, Everardo Chartuni Mantovani e Marcelo Carazo Castro

Resumo

No passado, havia grandes limitações para a utilização da energia fotovoltaica (FV): do ponto de vista técnico, ela ficava restrita a pequenos motores em corrente contínua (CC); e do ponto de vista econômico, o alto custo dos painéis solares inviabilizava a expansão dessa tecnologia. Com o desenvolvimento dos inversores de corrente, foi possível converter de forma econômica a CC produzida pelos módulos FV em corrente alternada (CA), utilizada pelos motores normalmente empregados nos sistemas de irrigação. A restrição da potência dos motores possível de serem acionados com energia FV também foi superada. A redução dos custos dos painéis solares ocorreu de forma progressiva ao longo dos anos, sendo resultado de muitas melhorias, tanto técnicas quanto econômicas. De forma semelhante, a redução dos custos das baterias acompanhada de seu aperfeiçoamento técnico possibilitou a expansão dos sistemas fotovoltaicos desconectados da rede elétrica (sistemas *off grid*), refletindo em sua maior utilização na agricultura irrigada. Apesar da grande redução nos custos, os sistemas de irrigação FV continuam ainda sendo muito onerosos para os produtores rurais brasileiros e o desafio atual é facilitar o seu acesso ao crédito. Por ser um país tropical, o Brasil possui grande potencial para produção da energia FV, o que está sendo normatizado progressivamente com legislações federais. Entretanto, a lei em vigor (Lei 14.300/2022), ao sobretaxar a geração elétrica FV, pode desestimular a ampliação futura dos sistemas FV, afetando a agricultura irrigada. Logo, outro desafio seria a flexibilização da legislação a fim de tornar a agricultura irrigada não apenas uma fonte de alimentos, de fibras e de divisas para o país, mas também de energia, insumo indispensável para o progresso brasileiro.

19.1 Introdução

Alguns estudos indicam que, no Brasil, haverá uma redução das áreas agricultáveis como consequência das mudanças climáticas (DECONTO, 2008). Diante deste cenário, espera-se um aumento na demanda por irrigação, ampliando-se tanto a extensão das áreas irrigadas quanto a necessidade de água requerida pelas culturas (SENTELHAS, 2021). Pode-se observar, então, a importância que a irrigação terá para a segurança alimentar e o agronegócio nacional. Entretanto, o crescimento da agricultura irrigada demandará mais energia para seu atendimento o que pode ser feito com uma contribuição relevante da energia solar fotovoltaica.

A utilização da energia solar para geração de eletricidade teve um crescimento exponencial a nível mundial na última década (INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY, 2020). Seu uso pode evitar a utilização de geradores com motores de combustão interna, sendo então uma solução sustentável mais limpa e ecológica para a obtenção de energia elétrica em áreas remotas. Esta utilização pode ser realizada com sistemas fotovoltaicos conectados a rede elétrica da concessionária de energia (sistemas *on-grid*) ou desconectados (sistemas *off-grid*).

Deve-se ressaltar que o Brasil recebe em média uma irradiação solar de $5400 \text{ Wh m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$, com uma maior concentração nos estados do nordeste. Mesmo nos estados com menor

irradiância solar, como o Rio Grande do Sul, a intensidade média supera a de países europeus que utilizam amplamente a energia solar, como a Alemanha (PEREIRA *et al.*, 2017).

Tem-se observado um aumento expressivo da capacidade de geração de energia elétrica fotovoltaica (FV) no Brasil, seguindo a tendência mundial. Em 2012, a potência fotovoltaica instalada no país era de aproximadamente 7 MW enquanto que, em janeiro de 2022, ela ultrapassou os 13.500 MW (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA, 2022).

Ciente da importância da energia elétrica para a produção econômica brasileira, o Governo Federal tem estimulado a adoção de alternativas energéticas para sua geração, a fim de facilitar o acesso a mesma (BRASIL, 2019). Tal ação foi bem recebida pelos produtores rurais, uma vez que a irrigação é uma das atividades que demandam maior utilização de energia na agropecuária (GUZMÁN *et al.*, 2018).

Além dos estímulos governamentais, outros fatores têm proporcionado uma expansão do setor FV brasileiro como a redução dos custos de implantação, maior oferta de mão-de-obra especializada e elevação das tarifas de energia elétrica. Isso tem gerado grande interesse por parte dos produtores rurais irrigantes, uma vez que a energia elétrica é o insumo de maior custo operacional dos sistemas de irrigação (BRASIL, 2019).

Os sistemas de bombeamento de água com energia solar fotovoltaicos estão entre as aplicações agrícolas mais promissoras com energia solar, especialmente em locais remotos sem acesso confiável à rede elétrica e nem a combustível diesel de baixo custo. Esses sistemas são ecoambientais com baixa manutenção e sem nenhum custo de combustível (GORJIAN *et al.*, 2020). São semelhantes aos de bombeamento convencionais (com energia elétrica da rede pública ou com motores a óleo diesel), a exceção da origem de energia para o motor.

Com inovações técnicas em sistemas de bombeamento movidos a energia FV, grande atenção tem sido dada à implantação dessa tecnologia em todo o mundo. Um progresso notável na tecnologia de bombeamento movido a energia solar fotovoltaica foi alcançado, superando as limitações técnicas apresentadas pelos primeiros sistemas de bombeamento solar de água. Com o esperado crescimento no custo dos combustíveis fósseis e a queda no custo das células solares, a energia fotovoltaica está se tornando cada vez mais acessível (GORJIAN *et al.*, 2020).

19.2 Evolução histórica do custo da implantação fotovoltaica

Os custos de aquisição de qualquer equipamento influenciam diretamente no volume de sua adoção pela sociedade. Isso não foi diferente para os sistemas fotovoltaicos, como apresentado a seguir.

Em 1975, o valor do painel FV era de US\$ 105,7/W; no ano 2000 era de US\$ 5,0/W e em 2020 tinha-se um valor de US\$ 0,2/W. Assim, nota-se que o preço da energia solar fotovoltaica diminuiu 25 vezes em relação ao do ano 2000, o que representa uma redução nos custos de 96 % em 20 anos (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2020).

Kavlak, McNerney e Trancik (2018) estudaram as causas da rápida diminuição dos custos dos módulos fotovoltaicos ao longo de quarenta anos e concluíram que:

- (i) o aumento da eficiência do módulo para a produção de eletricidade foi uma das principais causas de redução de custos entre 1980 e 2012, resultado dos esforços de pesquisa;
- (ii) após 2001, as economias de escala tornaram-se uma causa mais significativa de redução de custos. O tamanho das fábricas aumentou de 1 MW em 1980 para 1000 MW em 2012, resultando em economias de escala por meio de menor custo unitário

de matérias-primas, infraestrutura compartilhada, redução das exigências de mão de obra, maior rendimento e melhor controle de qualidade. Esse fato foi especialmente significativo após 2012, o qual contribuiu para uma redução significativa no custo do módulo. Nesse sentido, Roser (2020) menciona que a cada duplicação da capacidade de produção acumulada instalada, o preço dos módulos solares diminui 20,2 %.

- (iii) a melhoria da eficiência de fabricação, como por exemplo com o uso de revestimento antirreflexo e materiais encapsulantes, além do próprio processo de fabricação das células fotovoltaicas e reciclagem de materiais. O rendimento de produção das células passou de 75% em 1980 para 95% em 2012;
- (iv) redução da espessura das próprias placas fotovoltaicas, demandando uma diminuição da quantidade de silício necessária para sua fabricação;
- (v) melhor aproveitamento da área do módulo para a produção FV;
- (vi) reduções nos custos de materiais que não são de silício sempre foram fontes importantes de redução de custos, o que era feito por volume ou economias de escala em indústrias fornecedoras de materiais, e/ou projetos mais específicos de sua aplicação.

Associadas aos módulos fotovoltaicos estão as baterias. Elas são necessárias para sistemas fotovoltaicos *off-grid* e em alguns tipos de sistemas *on-grid*. Tem-se observado que o preço das baterias de íon-lítio diminuiu 97 % nas últimas três décadas, o que significa uma redução de 41 vezes. Assim, uma bateria com capacidade de um quilowatt-hora que custava US\$ 7.500,00 em 1991, passou a custar US\$ 181,00 em 2018. Apenas entre 2014 e 2018 o custo caiu pela metade. Em geral, o preço real por capacidade de energia desse tipo de bateria tem reduzido 13 % ao ano. Cada vez que a capacidade de produção das baterias duplica, os preços caem em média 18,9 %, o que é semelhante aos dos módulos solares fotovoltaicos. Além da redução dos custos, as melhorias tecnológicas das baterias tem proporcionado um aumento na densidade de carga. Em 1991, por exemplo, se obtinha 200 Wh de capacidade por litro de bateria, contra os mais de 700 Wh em 2020 (RITCHIE, 2021; ZIEGLER; TRANCIK, 2021).

19.3 Composição dos sistemas fotovoltaicos (FV) de bombeamento para irrigação

Um sistema de bombeamento fotovoltaico é basicamente composto por: (i) painel fotovoltaico; (ii) sistema de controle de energia; (iii) sistema de bombeamento conectado diretamente ou não ao sistema de irrigação; e (iv) sistema de distribuição ou de armazenamento, que pode ser uma caixa d'água (CAMPANA; LI; YAN, 2013). As Figuras 1 e 2 ilustram um esquema de sistema de irrigação FV do tipo *off-grid* e *on-grid*, respectivamente.

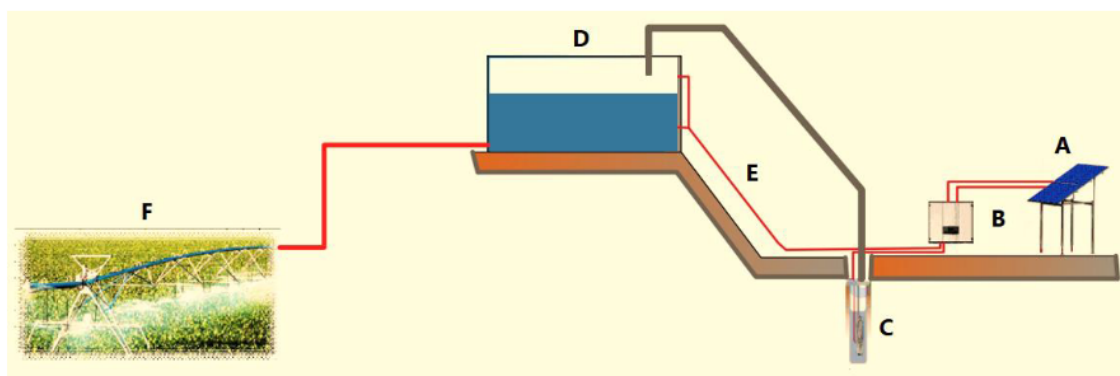


Figura 1. Esquema de um sistema de irrigação fotovoltaico *off-grid*: (A) módulos FV; (B) inversor de frequência; (C) conjunto motobomba; (D) reservatório; (E) sistema de controle de nível; (F) sistema de distribuição de água. (Adaptado de SANTANA *et al.*, 2021).

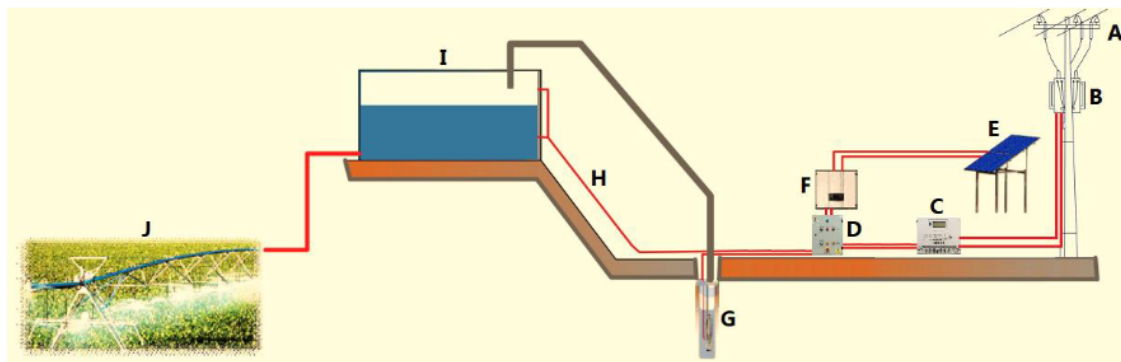


Figura 2. Esquema de um sistema de irrigação fotovoltaico *on-grid*: (A) rede pública de energia; (B) transformador; (C) medidor de energia; (D) quadro de energia; (E) módulos FV; (F) inversor de frequência; (G) conjunto motobomba; (H) sistema de controle de nível; (I) reservatório; (J) sistema de distribuição de água. (Adaptado de SANTANA *et al.*, 2021).

19.3.1 Painel FV e acessórios

A energia solar apresenta-se com elevada variabilidade espacial e temporal, decorrente de efeitos astronômicos, da inclinação do eixo terrestre, de fenômenos que ocorrem no sol e aqueles associados a atmosfera terrestre. Deve-se considerar ainda a influência da inclinação do objeto (painel FV) na superfície terrestre, que pode favorecer ou não a absorção da energia recebida (VIANELLO; ALVES, 1991).

Várias são as tecnologias disponíveis no mercado fotovoltaico, dentre as quais o grupo das células convencionais: células de silício monocristalino e de silício policristalino; grupo dos filmes finos: as células de silício amorfo e as células do composto binário, que compõem o grupo III-IV da tabela periódica dos elementos, disseleneto de cobre e índio (CIS), de índio e gálio (CIGS) ou de telureto de cádmio (CdTe), as de arseneto de gálio (GaAs), as do composto ternário, como exemplo, dissulfeto de cobre e índio (CuInSe₂), e as células de multijunção (BOLTON, 1982).

O tipo de tecnologia solar fotovoltaica a ser utilizada depende das características óticas de cada uma, do seu *band gap*, do seu coeficiente de absorção ou sua resposta espectral, associada com suas propriedades eletrônicas, que irão indicar o seu rendimento de acordo com a área disponível para a instalação do sistema (MANZANARES, 2008).

As células fotovoltaicas normalmente encontradas no mercado são à base de silício, notadamente o silício policristalino que possui uma boa relação custo-eficiência (GREENPRO, 2004). Os autores atestam também que as células são compostas por dois materiais semicondutores separados por uma barreira de potencial, em que, quando há a incidência da radiação em um desses materiais cria-se uma diferença de potencial na célula, e ao fechar-se o circuito ligando um material ao outro tem-se uma corrente elétrica.

Os módulos fotovoltaicos são constituídos por um arranjo de células, que quando conectadas, atingem o valor total de tensão e corrente que determinam a potência do módulo atendendo-se, assim, aos interesses comerciais. O dimensionamento de um projeto fotovoltaico considera entre outros aspectos técnicos, a incidência de energia solar sobre o local onde o sistema será implementado, a demanda de carga consumida e qual a potência do sistema fotovoltaico que atenderá ao consumidor (VILLALVA; GAZOLI, 2012).

Em sistemas de bombeamento movidos a energia fotovoltaica, o painel FV é instalado em uma estrutura fixa ou móvel (rastreador). Neste último caso, permite-se ao painel fazer o acompanhamento da trajetória do sol, mantendo-o perpendicular a ele (CAMPANA; LI; YAN, 2013; ALIYU *et al.*, 2018). Alguns estudos indicaram que a utilização de um rastreador mecânico solar de dois eixos, horizontal e vertical, pode resultar em um aumento de até 22 % na captação da energia solar (MORALES, 2011). Isso propicia o aumento em até 41 % o volume de água bombeada com o mesmo painel FV, dependendo das condições locais (EDRIZZI; SAUER, 2002).

Uma tecnologia que vem despontando recentemente é a utilização de painéis solares do tipo dupla face, ou bifaciais. Estes painéis possuem células fotovoltaicas em ambas as faces do módulo fotovoltaico, sendo capazes de absorver também a energia solar refletida da superfície do solo. Associado aos sistemas de rastreamento, os sistemas FV bifaciais possibilitam incrementar a produção de energia em 35 % (PORTALSOLAR, 2022).

Para reduzir a quantidade de painéis FV empregados em um sistema de bombeamento, e assim reduzir o custo de implantação do mesmo, pode-se utilizar dispositivos concentradores da energia solar. Tais equipamentos são baseados na reflexão dos raios para uma única região, no caso a placa FV. Melo Filho (2006), por exemplo, avaliou o desempenho de um concentrador solar tipo "V" acoplado óticamente a um gerado FV para o acionamento de um sistema de irrigação por gotejamento. Ele observou um aumento na taxa de bombeamento em 1,68 e 2,28 em relação ao sistema com rastreamento e ao sistema com estrutura fixa, respectivamente.

19.3.2 Sistema de controle de energia

O sistema de controle de energia, ou sistema de controle de potência, é uma interface entre o sistema motobomba e os módulos fotovoltaicos. Tal sistema é composto por dispositivos condicionadores de potência que auxiliam o controle da energia FV produzida, maximizando sua eficiência. Dentre os vários dispositivos, destacam-se os conversores de corrente contínua para corrente contínua (CC/CC) e os inversores de corrente contínua para corrente alternada (CC/CA). Os conversores CC/CC ajustam a corrente e tensão produzidas regulando-as para seu correto atendimento aos motores CC. Os inversores CC/CA, por sua vez, convertem a corrente contínua produzida pelo sistema FV em corrente alternada para utilização pelos motores (MORALES, 2011).

Ressalta-se que o desenvolvimento do inversor CC/CA foi o principal progresso técnico da tecnologia de bombeamento fotovoltaico, que possibilitou o uso de motores CA nos sistemas de bombeamento FV (GAO *et al.*, 2018). Além de permitir o uso de motores CA, os inversores de potência são utilizados para conectar os sistemas fotovoltaicos à rede de distribuição elétrica (sistemas *on-grid*) (CORTEZ; DÍAZ, 2010).

Os controladores de carga de baterias se constituem em uma aplicação importante dos conversores CC/CC. Estes dispositivos controlam de forma precisa o fornecimento da energia FV produzida que é aplicada às baterias, garantindo-lhes uma maior vida útil. Tais conversores são ainda utilizados em sistemas que não utilizam baterias. Neste caso, eles operam como controladores entre a energia produzida pelos painéis FV e a consumida pelo motor CC (PINHO; GALDINO, 2014).

Tanto o conversor quanto o inversor são geralmente equipados com um dispositivo rastreador do ponto de máxima potência (MPPT) para maximizar a extração de energia do painel solar, pois operam sempre no ponto de máxima potência da curva corrente-tensão do sistema FV (CAMPANA, LI, YAN, 2013). O uso do MPPT se justifica devido a incapacidade dos sistemas mais simples de trabalharem no ponto de potência máxima do gerador fotovoltaico

devido à alta dependência das condições climáticas diárias (CHANDEL *et al.*, 2015). O MPPT é considerado um progresso tecnológico importante para os sistemas FV (GAO *et al.*, 2018).

Um estudo mostrou, por exemplo, que um sistema de acoplamento direto utiliza apenas 31% da capacidade fotovoltaica. Para não precisar superdimensionar o painel FV por causa disso, um rastreador de ponto de potência máxima pode ser utilizado. Os MPPTs podem extrair mais de 97% da energia fotovoltaica quando devidamente otimizados (OI, 2005).

19.3.3 Sistemas de armazenamento de energia

Para que o sistema FV de bombeamento possa ser utilizado de forma consistente na ausência, na insuficiência ou durante as oscilações da radiação solar, respectivamente período noturno, dias nublados e dias parcialmente nublados, é imperativo armazenar energia. Isso pode ser feito basicamente de duas formas: (i) armazenamento em baterias da energia elétrica FV produzida, ao todo ou em parte. No primeiro caso, o carregamento das baterias pode ser feito, por exemplo, no período que antecede o funcionamento da irrigação e no segundo caso armazenando apenas o excesso de energia não consumido pelo sistema; (ii) armazenamento da água bombeada em reservatórios. (HADJ *et al.*, 1999; RIZI; ASHRAFZADEH; RAMEZANI, 2019; TIMANÁ, 2019).

A utilização de baterias deve ser feita considerando-se questões logísticas-econômicas, pois haverá uma maior necessidade de manutenção e uma menor confiabilidade do sistema. Além disso, elas acarretam a diminuição da eficiência global do sistema fotovoltaico, além de serem caras, o que eleva o custo do sistema FV (KHATIB; MUHSEN, 2021). Geralmente, as baterias possuem pequena vida útil (seis anos contra 20 a 30 anos dos painéis fotovoltaicos) e produzem poluentes. A durabilidade delas é função do seu tipo e de suas condições ambientais e operacionais, como a temperatura ambiente e profundidade de descarga projetada. Sua utilização é justificada mais facilmente quando é necessário irrigar no período noturno (HADJ *et al.*, 1999; TIMANÁ, 2019).

Muitos tipos diferentes de baterias recarregáveis adequadas para aplicações fotovoltaicas estão disponíveis atualmente. O tipo mais utilizado é a de chumbo-ácido, pois permite um armazenamento relativamente econômico de quantidades úteis de energia elétrica. No entanto, a menos que ocorra melhorias na densidade de energia, no custo e na vida útil, outras tecnologias promissoras podem superá-la, como a de lítio (MESSENGER; ABTAHI, 2017).

Alternativamente, o armazenamento de água em um reservatório elevado é mais econômico, simples, seguro, eficiente e confiável do que o armazenamento de energia em baterias (LAMIGUEIRO, 2020; KHATIB; MUHSEN, 2021). Neste caso, os sistemas fotovoltaicos de bombeamento são dimensionados para armazenar água extra em dias ensolarados de forma que esteja disponível em dias nublados e à noite. A água pode ser armazenada em um tanque de irrigação maior do que o necessário ou em um tanque de armazenamento separado e, em seguida, alimenta por gravidade tanques de irrigação menores, ou mesmo o próprio sistema de distribuição de água (HALM, 2000). Normalmente, o tanque de armazenamento é projetado para proporcionar autonomia de três dias sem qualquer radiação solar para atender à demanda hídrica necessária (KHATIB; MUHSEN, 2021). Pode-se ainda, ao invés de realizar diretamente a irrigação com essa água armazenada, utilizá-la para girar uma turbina e produzir a eletricidade necessária para o acionamento do conjunto de bombeamento (MESSENGER; ABTAHI, 2017).

De forma geral, os sistemas FV de bombeamento para irrigação não utilizam baterias, mas às vezes são acoplados a sistemas de armazenamento de água, para operação em situações de dias nublados ou irrigações noturnas (AGRAWAL; JAIN, 2019). Porém, um tipo de sistema FV de bombeamento para irrigação que tem se destacado economicamente é a

irrigação direta FV autônoma, que não utiliza nem baterias e nem reservatórios (OKASHA, 2016; RECA *et al.*, 2016).

19.3.4 Medidores de energia

Medidores de energia são dispositivos obrigatórios nos sistemas FV *on-grid*. Em tais sistemas, pode-se utilizar: (i) dois medidores unidirecionais, sendo um para a medição da energia produzida pelos painéis FV e o outro para a medição da energia consumida pelo motor; (ii) um medidor bidirecional, que desempenha a função dos dois medidores unidirecionais anteriores. Ressalta-se que ambas as medições, da energia produzida e da energia consumida, são realizadas de forma independente (PINHO; GALDINO, 2014).

19.4 Modelos de utilização da energia solar FV em sistemas de irrigação

19.4.1 Sistemas de bombeamento e suas conexões ao sistema de geração FV

Existem quatro tipos de bombas que são utilizadas nos sistemas FV de bombeamento: diafragma, pistão, helicoidal e centrífuga. As três primeiras são chamadas de deslocamento positivo, e possuem a característica de fornecer altas pressões, mas pequenas vazões, normalmente inferior a 1000 L h^{-1} , e capacidade de trabalho com elevadas alturas de sucção. As características das bombas centrífugas são opostas: proporcionam maiores vazões e pequena altura de sucção. Entretanto, a bomba centrífuga é a melhor escolha quando a potência FV supera 1,5 kW, bem como quando há necessidade de bombeamento de elevados volumes diários (VICK; CLARK, 2009). De forma geral, para pequenas potências ($< 0,2 \text{ kWp}$) são utilizadas principalmente as bombas de deslocamento positivo do tipo diafragma, que fornecem altura manométrica elevada e vazão baixa, e em potências maiores, predominam as bombas centrífugas, que podem fornecer vazões mais elevadas (EDRIZZI; SAUER, 2002).

As quatro configurações típicas de motor elétrico e bomba mais utilizadas com os sistemas FV são: (i) motobomba submersível com motor CA; (ii) bomba submersível com motor de superfície; (iii) motobomba flutuante com bomba centrífuga e; (iv) motor CC com bomba centrífuga flutuante (LAMIGUEIRO, 2020).

O acoplamento entre o sistema FV e o motobomba pode ser feito de três formas distintas: (i) direto; (ii) por meio de baterias; (iii) por meio de equipamento condicionador de potência (UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE - NATURAL RESOURCES CONSERVATION SERVIC, 2016).

O acoplamento direto do arranjo FV com o sistema de bombeamento de água foi introduzida pela primeira vez no final dos anos 1970, quando havia algumas limitações nos projetos anteriores em termos de desempenho geral (CHANDEL *et al.*, 2015; GAO *et al.*, 2018). Esse tipo é o de configuração mais simples, caracterizando-se ainda pelos baixos custos de aquisição e de manutenção. É utilizado principalmente com pequenos motores CC, com potências limitadas a 400 Watt pico (Wp), acoplados a bombas de deslocamento positivo (MORALES, 2011). Nesse caso, a tensão de operação do motor deve ser a mesma da geração FV, ou seja, 12 ou 24 VCC.

No acoplamento por meio de baterias, o motor possui conexão a um banco de baterias que pode alimentá-lo de forma exclusiva ou de forma a complementar a energia insuficiente da fonte FV para uma operação com velocidade de rotação constante. Já no caso de acoplamento utilizando condicionador de potência, ou MPPT, descrito na seção anterior, estes dispositivos extraem a potência máxima do painel FV para cada condição atmosférica singular, transferindo-a ao motor.

19.4.2 Benefícios e limitações da energia FV em sistemas de irrigação

No planejamento de sistemas de irrigação FV, pode-se mencionar os seguintes benefícios:

- (i) A utilização de energia solar FV no sistema *off-grid* permite utilizar sistemas de irrigação especialmente em áreas que não têm acesso confiável à eletricidade ou não podem arcar com o custo do combustível diesel (GAO *et al.*, 2018). Assim, a energia solar FV pode auxiliar na expansão das áreas irrigadas;
- (ii) A energia solar FV no sistema *off-grid* proporciona uma facilidade para a implantação da automação dos sistemas de irrigação;
- (iii) A utilização da energia solar em sistemas de irrigação *on-grid* possibilita ao produtor ampliar seus rendimentos, tornando-se também um "produtor de energia". Nesse caso, o excesso de energia produzida pelo sistema FV seria injetado na rede, bem como toda a produção originada na entressafra;

A utilização da energia FV pode contribuir para a modernização dos sistemas de irrigação, viabilizando a substituição dos métodos de superfície pelos pressurizados (EYRE *et al.*, 2014).

Quanto às limitações tem-se:

- (i) Alto custo de aquisição, o que desestimula sua utilização quando a rede elétrica da concessionária está próxima da área irrigada;
- (ii) Perda de área de cultivo para sua implantação, o que pode ser crítico, ou mesmo inviável, em pequenas áreas rurais;
- (iii) De forma geral, os sistemas de irrigação FV requerem um maior capital inicial para sua implantação que seus similares a energia elétrica da concessionária ou a óleo diesel.

Do ponto de vista agrônomo e econômico, as bombas fotovoltaicas são melhor empregadas em cultivos intensivos de alto valor sob abordagens de irrigação que economizem água (SASS; HAHN, 2016).

Na operacionalização dos sistemas de irrigação, pode-se mencionar como benefícios:

- (i) Como a necessidade de água é maior em períodos quentes e secos, o que geralmente ocorre quando há grande disponibilidade de radiação solar, a produção FV coincide com a necessidade de água das plantas (LABOURET; VILLOZ, 2009). Assim, o período de maior demanda pelas culturas coincide também com o de maior capacidade de bombeamento FV;
- (ii) A energia solar FV proporciona maior confiabilidade de operação do sistema de irrigação, eliminando a preocupação do fornecimento estável e de qualidade da energia elétrica do sistema público;
- (iii) O custo operacional dos sistemas de irrigação FV é praticamente nulo, restrito basicamente a limpeza periódica dos painéis fotovoltaicos.

Já com relação à limitação:

- (i) Dada uma maior disponibilidade energética dos sistemas de irrigação FV, há o risco inerente de super utilização dos recursos hídricos utilizando esta tecnologia (SASS; HAHN, 2016).

19.4.3 Aplicabilidade dos sistemas fotovoltaicos em sistemas de irrigação

Para Cortez & Díaz (2010), os sistemas de irrigação FV são recomendados principalmente para pequenos produtores em regiões áridas e remotas cuja dificuldade de acesso à rede elétrica convencional tornam o seu investimento inicial muito elevado. Nesse sentido Hilarydoss (2021), os recomenda fortemente também para regiões com no máximo 300 a 400 mm de chuva por ano e distante no mínimo 2 km da rede elétrica da concessionária local, não especificando, entretanto, o tamanho da área irrigada.

O alto custo de aquisição dos sistemas FV de bombeamento para irrigação, apesar da grande redução nos valores comerciais dos módulos FV, e a falta de suporte financeiro (crédito) para os pequenos produtores se constituem nas principais dificuldades para a difusão deste tipo de sistema na agricultura irrigada (GAO *et al.*, 2018). Porém, não são os únicos problemas enfrentados na maioria dos países em desenvolvimento. Pode-se citar ainda o desconhecimento desta tecnologia que leva aos desafios relacionados à conscientização tecnológica e a falta de disponibilidade de mão de obra qualificada em áreas rurais, além das preocupações relacionadas à sua implantação sustentável (CHANDEL *et al.*, 2015; AGRAWAL; JAIN, 2019).

19.4.4 Parâmetros para o estudo da viabilidade econômica da irrigação FV

Para grandes áreas irrigadas nos EUA, como aquelas sob pivô central, a viabilidade da utilização de sistemas *off-grid* depende da taxa de utilização anual do sistema de irrigação, da possibilidade de utilização do excesso de energia FV gerada e dos subsídios governamentais. Uma estratégia empregada é utilizar dentro da própria fazenda, em outras atividades, o excesso de energia FV gerada ao invés de vendê-la para a concessionária de energia (VICK; ALMAS, 2011).

Na correta avaliação da viabilidade do uso de sistemas de bombeamento FV, em relação às formas alternativas de acionamento motriz com óleo diesel, deve-se considerar todo o ciclo de vida do equipamento FV (20 anos), e não apenas a do sistema a diesel, de menor vida útil.

Deve-se considerar ainda o valor da lâmina bruta diária utilizada, a altura manométrica do sistema e o número de ciclos anuais de produção. Quanto maior for a utilização do sistema de irrigação, maior será a viabilidade da adoção da energia FV em relação àquele com acionamento a óleo diesel, por exemplo (HAQUE, 2001).

Também deve-se considerar a possibilidade de utilização de reservatório de água para prolongar a duração da irrigação, bem como considerar a geração de energia do sistema FV fora da estação de cultivo para proporcionar renda adicional (POWELL; WELSH, 2019).

Avaliar se é econômico atender a época de maior demanda hídrica dos cultivos se os irrigantes não tiverem outros usos para essa energia na fazenda, ou se é melhor considerar uma irrigação deficitária (EYRE *et al.*, 2014).

O ponto máximo de aproveitamento da irradiação solar foi entre 5 e 6 horas por dia de funcionamento do sistema de irrigação, o mesmo ocorrendo com o custo total do sistema de irrigação fotovoltaico (ANDRADE, 2017).

Em trabalho realizado para o norte de Minas Gerais por Andrade (2017), para uma área de 4 ha de irrigação por aspersão convencional e bombeamento de poço tubular, comparando o uso de energia elétrica da rede da concessionária com o uso de um sistema FV *on-grid*, encontrou-se maior viabilidade no projeto fotovoltaico, com uma TIR de 11,18 %, VPL positivo de R\$ 4.613,20 e *payback* de 15 anos. Acredita-se que os índices de viabilidade econômica sejam mais favoráveis atualmente, uma vez que os custos das tarifas energéticas das

concessionárias sofreram grandes reajustes e o valor da instalação dos sistemas fotovoltaicos tiveram grande redução nos últimos anos.

De forma geral, tempos elevados de retorno de investimento (*payback*), por exemplo acima de oito anos, levam ao desinteresse dos empresários rurais à adoção da tecnologia FV. Na Austrália, por exemplo, um *payback* desejável seria de até quatro anos (WELSH, 2016).

19.5 Elementos para o dimensionamento de sistemas de irrigação FV

19.5.1 Considerações gerais

Para projetar um sistema de irrigação FV, o primeiro passo é a avaliação dos recursos hídricos disponíveis, sejam subterrâneos ou superficiais. As outras etapas relevantes incluem a determinação da demanda hídrica das culturas, o estudo dos dados de clima e de radiação solar, a estimativa ou cálculo da energia solar disponível, a determinação da taxa de aplicação do sistema de irrigação e a escolha dos módulos fotovoltaicos, do conjunto motobomba, e de outros dispositivos eletrônicos, hidráulicos e unidades auxiliares (GAO *et al.*, 2018). Dentre todos esses elementos, os mais importantes para o desempenho de um sistema FV de bombeamento são: (i) disponibilidade de radiação solar e variações da temperatura do ar no local de instalação; (ii) altura manométrica total; (iii) vazão; (iv) volume diário de água necessária (CHANDEL *et al.*, 2015).

De forma geral, os sistemas de distribuição de água pertinentes aos sistemas de irrigação FV tem sido projetados de forma tradicional, como se a fonte de energia fosse proveniente da rede elétrica pública. Isso pode ser observado no projeto de irrigação para estufas (RECA *et al.*, 2016), para pequenas áreas abertas (GUZMÁN *et al.*, 2018; OKASHA, 2016), e em outros locais irrigados dotados unicamente de emissores do tipo compensadores de pressão (EHRMANN; FICKERT; NOLZB, 2019; PANDE *et al.*, 2003). Em comum, observa-se nos mesmos um superdimensionamento das tubulações secundárias e terciárias de irrigação.

O dimensionamento dos sistemas de irrigação FV é extremamente afetado pelo caráter dinâmico da demanda hídrica e da energia solar coletável (CHANDEL *et al.*, 2015). Devido à natureza sazonal da radiação solar, normalmente é feito um superdimensionamento dos sistemas FV e/ou armazenamento de energia, quando não se utilizam simulações refinadas dos parâmetros hídrico-meteorológicos (CARROQUINO; LOPEZ; AGUSTÍN, 2015).

Entretanto, um superdimensionamento do sistema solar fotovoltaico, a fim de minimizar as consequências da variabilidade do bombeamento ou para atender a alguma necessidade casual do projeto, deve ser analisado com cautela. Eyre *et al.* (2014) por exemplo, mencionam que a infraestrutura solar em escala suficiente para atender à demanda de pico de irrigação não é economicamente viável para os irrigantes australianos que não têm outros usos para a energia na fazenda. Neste caso, pode-se considerar a utilização de um sistema híbrido solar-diesel para o atendimento de demandas evapotranspirométricas de pico, ao invés de dimensionar um sistema fotovoltaico para atender integralmente a todo ciclo de produção. Isso evita que o sistema fotovoltaico fique ocioso uma grande parte do tempo, reduzindo seus custos de implantação.

Sempre que possível, deve-se estudar alternativas para o bombeamento FV. Uma análise econômica preliminar com base nos custos de aquisição mostrou, por exemplo, que a solução mais econômica para uma situação específica foi obtida quando se adotou arranjo fotovoltaico fixo e motor CA, em relação ao arranjo com rastreamento e adoção de motor CC (CAMPANA; LI; YAN, 2013).

Historicamente, a forma de se contornar a variabilidade solar incidente é utilizando-se reservatórios de água (KENNA; GILLET, 1985). Outra forma seria a utilização de baterias

para armazenar energia elétrica e flexibilizar sua utilização. Em todo caso, o planejamento adequado, baseado em estudo de dados históricos diários de irradiância solar, auxilia a utilização adequada da energia solar fotovoltaica na irrigação (SANTANA *et al.*, 2021).

Especificamente para o dimensionamento elétrico e para a avaliação dos sistemas fotovoltaicos *on-grid* e *off-grid*, bem como para a especificação e o ensaio de alguns de seus elementos constituintes, a Associação Brasileira de Normas Técnicas possui nove publicações sobre o assunto. São elas: NBR 14.201/1998, NBR 14.202/1998, NBR 62.116/2012, NBR 16.149/2013, NBR 16.150/2013, NBR 16.274/2014, NBR 16.767/2019, NBR 16.690/2019 e NBR 16.612/2020. Pode-se perceber que as mesmas são relativamente recentes, tendo a maioria menos de 10 anos de existência. Isso reflete o avanço considerável da utilização desta tecnologia no Brasil.

19.5.2 Fatores que afetam a eficiência dos sistemas de geração de energia FV

Diversos fatores afetam o desempenho da geração de energia elétrica FV, dentre os quais se destacam aqueles que ocasionam perdas e, portanto, precisam ser considerados na elaboração do projeto de irrigação FV. Os principais tipos de perda são apresentados a seguir.

- (i) Perda decorrente do aumento de temperatura na célula FV: nos sistemas fotovoltaicos, a principal causa de perda está associada à temperatura do ar ambiente. Quanto maior for a temperatura, menor será a eficiência do módulo, e conseqüentemente menor será a potência produzida (PINHO; GALDINO, 2014);
- (ii) Perda devido a inclinação do módulo FV: a inclinação do módulo favorece a absorção ou a reflexão da radiação solar. A máxima absorção da radiação solar e, portanto, de geração de energia, ocorre quando o módulo encontra perpendicular à radiação solar incidente (PINHO; GALDINO, 2014);
- (iii) Perda devido ao tipo de célula FV utilizada: a eficiência da conversão da energia solar em elétrica depende das características construtivas do módulo FV, função da tecnologia e dos materiais utilizados (PINHO; GALDINO, 2014);
- (iv) Perda devido ao uso do inversor de frequência: a utilização de inversores CC/CA, necessários para a adoção de motores CA, implica em perdas internas neste dispositivo, as quais refletem sobre a eficiência global do sistema FV, reduzindo-a (MORALES, 2010). Estas perdas podem ser estimadas em 10% (PORTALENERGIA, 2010);
- (v) Perda devido a tensão de operação escolhida: Sempre haverá uma perda de energia nos condutores por efeito Joule, a qual será inversamente proporcional a tensão operacional escolhida. Assim, tensões mais elevadas devem ser preferidas para se ter melhores eficiências (MORALES, 2010). Tais perdas são limitadas de forma geral a 3% (PORTALENERGIA, 2010);
- (vi) Perda devido ao sombreamento: o sombreamento, mesmo que parcial dos módulos FV, leva a uma redução muitas vezes drástica da produção de energia. Em um experimento com sombreamento parcial na Argélia, por exemplo, observou-se uma redução de até 35% na eficiência de uma configuração de arranjo FV com dois painéis sombreados em cada linha; os resultados destas medições indicaram que vários painéis parcialmente sombreados resultaram em uma queda maior na eficiência do que uma única fileira completamente sombreada (MOHAMMEDI *et al.*, 2014);
- (vii) Perda devido ao tempo de uso do painel: quanto mais velhos forem os módulos, menor será sua eficiência. Um estudo realizado em painéis FV de silício monocristalino após 28 anos de exposição ao meio ambiente, por exemplo, indicou uma degradação da produção de energia fotovoltaica de cerca de 1,4% ao ano (CHANDEL *et al.*, 2015);

- (viii) Perda devido a sujeira acumulada sobre o painel: tem-se observado redução de até 30% na geração de energia devido ao acúmulo de poeira e outros materiais sobre a placa FV. Para evitar isso, um sistema de irrigação por microaspersão desenvolvido para essa finalidade tem sido utilizado para a limpeza automática dos painéis (SCHMIDT *et al.*, 2021);
- (ix) Perda devido ao uso de baterias: outra fonte de perdas é a bateria utilizada no sistema FV, uma vez que ela não restaura 100% da energia fornecida (LABOURET; VILLOZ, 2009). Nos bons projetos FV, estas perdas são limitadas a 10 % (PORTALENERGIA, 2010);
- (x) Perda devido a não operação do módulo FV na potência máxima (não utilização do MPPT): quando o regulador não é do tipo MPPT, surge uma perda por meio de incompatibilidade de tensão. Em um sistema com regulador clássico, a tensão é imposta pela bateria e, portanto, o módulo fotovoltaico não funciona em sua potência máxima (LABOURET; VILLOZ, 2009). Estas perdas podem ser estimadas em 10% (PORTALENERGIA, 2010).

19.5.3 Estimativa da área topográfica necessária para produção de energia FV para sistemas de irrigação

Os painéis fotovoltaicos são normalmente dimensionados especificando-se sua saída sob condições padrão de 100 mW por centímetro quadrado com a temperatura da célula em 25 °C. Esta saída é, no entanto, adversamente afetada pela temperatura, o qual reduz significativamente a potência nominal do painel (UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE - NATURAL RESOURCES CONSERVATION SERVICE, 2016). O dimensionamento também depende da tecnologia utilizada na fabricação dos módulos fotovoltaicos (PINHO; GALDINO, 2014), bem como de um fator de segurança para evitar o sombreamento recíproco de painéis dispostos um atrás do outro em uma grande instalação (HABERLIN, 2012).

É extremamente importante, conhecer a disponibilidade de irradiação solar incidente na região de instalação do sistema FV. Caso não se tenha essas informações, uma forma de obtê-las é com a utilização do atlas de irradiação solar do Brasil (PEREIRA *et al.*, 2017), onde encontra-se a irradiação média anual para todo território nacional. Pode-se notar que as regiões brasileiras mais propícias ao aproveitamento da energia solar são o interior do Nordeste e o norte do Estado de Minas Gerais (Figura 3).

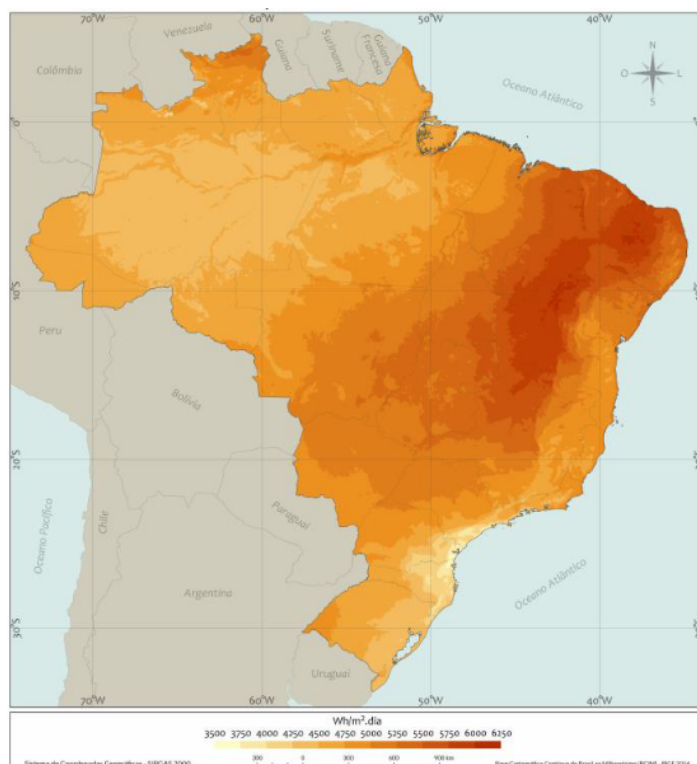


Figura 3. Atlas solarimétrico ilustrando o total diário da irradiação global horizontal, média anual para o território brasileiro em Wh/m²/dia. (PEREIRA *et al.*, 2017)

Para as condições médias brasileiras de irradiação solar, os sistemas de irrigação demandariam uma área para a instalação dos coletores solares que pode ser estimada pela equação 1.

$$A_{FV}F = 18,4 * P_{MB} \quad (1)$$

em que:

$A_{FV}F$: área necessária para instalação do sistema de geração FV, m²;

P_{MB} : potência da bomba de irrigação, CV.

Para sistemas de irrigação FV, os painéis solares são geralmente instalados ao nível do solo. Entretanto, eles podem ser ainda instalados sobre estruturas existentes, como estufas, sem a necessidade adicional de área (GAO *et al.*, 2018), ou mesmo em estruturas flutuadoras em represas ou açudes.

19.6 Legislação brasileira para sistemas fotovoltaicos

Algumas leis e diversas resoluções normativas tem marcado a história da legislação brasileira que norteia a utilização da energia solar em nosso país. Dentre estas, destaca-se a Lei 9.427, de 26 de dezembro de 1996, que estabeleceu as bases legais iniciais para a utilização das fontes de energia alternativa, como a solar fotovoltaica, juntamente com a criação da ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica.

As resoluções normativas da ANEEL 77/2004, 482/2012, 493/2012, 687/2015 e 800/2017 fazem parte dos principais marcos regulatórios que norteiam a utilização da energia solar fotovoltaica no Brasil. Entre os seus atos, pode-se mencionar: estabelecimento das regras para a conexão dos sistemas fotovoltaicos à rede elétrica pública e definição dos valores dos descontos nas tarifas de transmissão e de distribuição da energia elétrica gerada a partir da fonte solar.

As resoluções normativas da ANEEL são complementadas ainda com as Leis 13.169/2015, 13.203/2015 e 14.120/2021. Tais leis alteram a legislação possibilitando, entre outros, um aumento da potência injetada e atualização dos descontos nas tarifas de transmissão e de distribuição, bem como prazos de validade para sua aplicação. Definem ainda a forma de cobrança de ICMS para a energia solar.

Atualmente, vigora a Lei 14.300, de 6 de janeiro de 2022, que modificou parte da legislação anterior referente à energia solar fotovoltaica. Um de seus principais atos instituídos é a cobrança pela utilização da rede elétrica da concessionária no qual o sistema fotovoltaico está conectado. Tal valor é variável, pois depende dos custos tarifários específicos de cada concessionária. Entretanto, esta cobrança impactará negativamente na viabilidade econômica de futuras instalações fotovoltaicas, destinadas ou não à agricultura irrigada.

19.7 Considerações finais

A implantação dos sistemas de irrigação fotovoltaicos geralmente requer um maior aporte de recursos financeiros que seus similares à energia elétrica da concessionária ou por motores de combustão interna. Isso implica em um grande desafio presente e futuro: facilitar o acesso ao seu financiamento, principalmente para o pequeno irrigante.

Deve-se lembrar que, quanto maior for a utilização dos sistemas fotovoltaicos na irrigação, menor será a pressão exercida pela agricultura irrigada sobre o Sistema Elétrico Nacional, desafogando-o para atender a outras áreas socioeconômicas de nosso país, contribuindo para a preservação dos recursos hídricos, cada vez mais críticos, como observados nos dias atuais. Além disso, se devidamente estimulado por políticas público-econômicas governamentais, os sistemas de irrigação fotovoltaicos podem até mesmo vir a contribuir de forma significativa para uma maior disponibilidade de energia elétrica no Brasil, recurso este indispensável ao desenvolvimento nacional.

Referências

- AGRAWAL, S.; JAIN, A. Sustainable deployment of solar irrigation pumps: key determinants and strategies. **WIREs Energy and Environment**, v.8, n.2, 2019.
- ALIYU, M.; HASSAN, G.; SAID, S.A.; SIDDIQUI, M.U.; ALAWAMI, A.T.; ELAMIN, I.M. A review of solar powered water pumping systems. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.87, p. 61-76, 2018.
- ANDRADE, A.F. **Análise da análise da viabilidade econômica da implantação de projetos de irrigação por aspersão convencional com energia fotovoltaica**. Montes Claros, MG: ICA/UFMG, 59p., 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA (ABSOLAR). **Panorama da energia solar fotovoltaica no Brasil e no mundo**. Disponível em: <<https://www.absolar.org.br/mercado/infografico/>>. Acesso em: 14 fev. 2022.
- BOLTON, J.R. **Solar cells** - A technology assessment. Photochemistry Unit, Department of Chemistry, The University of Western Ontario, London, Ontario, 1982.
- BRASIL. Ministério do Desenvolvimento Regional. **Boletim da Agricultura Irrigada**, v.1, 7p., 2019. Disponível em:

<https://www.mdr.gov.br/images/stories/ArquivosSDRU/ArquivosPDF/Boletim_Agricultura-Irigada_Primeira-Edio_-Setembro-de-2019.pdf>. Acesso em: 30 jun. 2020.

CAMPANA, P.E.; LI, H.; YAN, J. Dynamic modelling of a PV pumping system with special consideration on water demand. **Applied Energy**, v.112, p. 635–645, 2013.

CARROQUINO, J.; LOPEZ, R.D.; AGUSTÍN, J.L.B. Sizing of off-grid renewable energy systems for drip irrigation in Mediterranean crops. **Renewable Energy**, v.76, p. 566-574, 2015.

CHANDEL, S.S.; NAIK, M.N.; SHARMA, V.; CHANDEL, R. Degradation analysis of 28 year field exposed mono-c-Si photovoltaic modules of a direct coupled solar water pumping system in western Himalayan region of India. **Renewable Energy**, v.78, p. 193-202, 2015.

CORTEZ, A.S.; DÍAZ, C.B. **Manual de pequeñas obras de riego en la agricultura familiar campesina**: características técnicas de las principales obras de riego bonificadas por INDAP. 2 ed. Santiago: INDAP, 225p., 2010.

DECONTO, J.G. **Aquecimento global e a nova geografia da produção agrícola no Brasil**. São Paulo: Posigraf, 82p., 2008.

EDRIZZI, M.C.; SAUER, I.L. Bombeamento solar fotovoltaico: histórico, características e projetos. In: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 4., 2002, Campinas. **Proceedings online...** Disponível em:

<http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=MSC0000000022002000100034&lng=en&nrm=abn>. Acesso em: 18 mai. 2021.

EHRMANN, S.; FICKERT, L. NOLZB, R. Optimizing the setup of a photovoltaic pumping system for irrigation considering different crop water requirements. **Journal of Photonics for Energy**, v.9, n 4, 2019.

EYRE, D.; ALEXANDRA, J.; RICHARDS, R.; SWANN, E. **The water & energy nexus**: a multi-factor productivity challenge. Queensland: NSW Farmers Association, 30p., 2014.

GAO, Z.; ZHANG, Y.; GAO, L.; LI, R. Progress on solar photovoltaic pumping irrigation technology. **Irrigation and Drainage**, v. 67, p. 89–96, 2018.

GORJIAN, S; SINGH, R.; SHUKLA, A.; MAZHAR, A.R. On-farm applications of solar PV systems. In: GORJIAN, S.; SHUKLA, A. (Ed.). **Photovoltaic Solar Energy Conversion**: Technologies, Applications and Environmental Impacts. New York: Academic Press, p. 147-190, 2000.

GREENPRO. **Energia fotovoltaica**: manual sobre tecnologias, projetos e instalação. Lisboa, 2004, v.2. Disponível em: <<http://www.greenpro.de/po/fotovoltaico.pdf>>. Acesso em: 24 fev. 2017.

GUZMÁN, A.B. *et al.* A Cost-Effective Methodology for Sizing Solar PV Systems for Existing Irrigation Facilities in Chile. **Energies**, v.11, 1853, 2018.

HABERLIN, H. **Photovoltaics**: system design and practice. London: John Wiley & Sons, 701p., 2012.

HADJ, A.; ARAB, F.; CHENLO, K.; MUKADAM, K.; BALENZATEGUI, J.L. Performance of PV water pumping systems. **Renewable Energy**, v.18, n.2, p.191-204, 1999.

HALM, A. Resource-conserving Irrigation with Photovoltaic Pumping Systems. In: EUROPEAN PHOTOVOLTAIC SOLAR ENERGY CONFERENCE, 16., 2000, Glasgow. **Proceedings...** Glasgow, 2000.

HAQUE, M.M. Photovoltaic water pumping system for irrigation. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON MECHANICAL ENGINEERING, 4., 2001, Dhaka/Bangladesh. **Proceedings...** Dhaka: International Association of Engineers, p. 21-26, 2001.

HILARYDOSS, S. Suitability, sizing, economics, environmental impacts and limitations of solar photovoltaic water pumping system for groundwater irrigation - a brief review. **Environmental Science and Pollution Research**, 2021.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **Evolution of solar PV module cost by data source, 1970-2020**. Disponível em: <<https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/evolution-of-solar-pv-module-cost-by-data-source-1970-2020>>. Acesso em: 04 jun. 2021.

- INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY (IRENA). **Solar Energy**. Disponível em: <<https://www.irena.org/solar>>. Acesso em: 4 jul. 2020.
- KAVLAK, G.; McNERNEY, J.; TRANCIK, J.E. Evaluating the causes of cost reduction in photovoltaic modules. **Energy Policy**, v.123, p.700-710, 2018.
- KENNA, J.; GILLET, B. **Solar water pumping: a handbook**. London: Russel, 123p., 1985.
- KHATIB, T.; MUHSEN, D.H. **Photovoltaic water pumping systems: concept, design, and methods of optimization**. London: Elsevier, 293p., 2021.
- LABOURET, A.; VILLOZ, M. **Solar photovoltaic energy**. 4ed. London: The Institution of Engineering and Technology, 372p., 2009. (IET Renewable Energy Series, 9).
- LAMIGUEIRO, O.P. **Energía solar fotovoltaica**. Madrid: Lamigueiro, 180p., 2020.
- MANZANARES, J.L.B. **Tecnología de Células Solares de Silício Cristalino**. 50p., 2008. Dissertação (Master em Energía Renovables y Mercado Energético). DER - CIEMAT (Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientas & Tecnológicas), 2008
- MELO FILHO, J.B. **Análise do sistema de irrigação na região semi-árida do nordeste, utilizando o bombeamento de água acionado por geradores fotovoltaicos com concentradores tipo V**, 167p., 2006. Tese (Doutorado em Tecnologias Energéticas e Nucleares), Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2006.
- MESSENGER, R.; ABTAHI, H.A. **Photovoltaic Systems Engineering**. 4ed. Boca Raton: CRC, 504p., 2017.
- MOHAMMEDI, A.; MEZZAI, N.; REKIOUA, D.; REKIOUA, T. Impact of shadow on the performances of a domestic photovoltaic pumping system incorporating an MPPT control: a case study in Bejaia, North Algeria. **Energy Conversion and Management**, v.84, p. 20-29, 2014.
- MORALES, L.R.V. **Utilização de sistemas fotovoltaicos de bombeamento para irrigação em pequenas propriedades rurais**.170p., 2011. Dissertação (Mestrado em Energia), Universidade de São Paulo, 2011.
- NARVARTE, L.; ALMEIDA, R.H.; CARRELO, I.B.; RODRIGUEZ, L.; CARRASCO, L.M., MORENO, F.M. On the number of PV modules in series for large-power irrigation systems. **Energy Conversion and Management**, v.186, p.516–525, 2019.
- OI, A. **Design and simulation of photovoltaic water pumping system**, 103 f., 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), San Luis Obispo: Faculty of California Polytechnic State University, 2005.
- OKASHA, A.M. Performance of a small drip irrigation system powered by solar photovoltaic for corn production. **Irrigation and Drainage**, v.33, n.4, p.1369-1386, 2016.
- PANDE, P.C.; SINGH, A.K.; VYAS, S.K.; DAVE, B.K. Design development and testing of a solar PV pump-based drip system for orchards. **Renewable Energy**, v.28, n.3, p.385–396, 2003.
- PEREIRA, E.B.; MARTINS, F.R.; GONÇALVES, A.R.; COSTA, R.S.; LIMA, F.L.; RÜTHER, R.; ABREU, S.L.; TIEPOLO, G.M.; PEREIRA, S.V.; SOUZA, J.G. **Atlas brasileiro de energia solar**. 2.ed. São José dos Campos: INPE, 80p., 2017.
- PINHO, J.T.; GALDINO, M.A. **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos**. Rio de Janeiro: CRESESB, 2014.
- PORTALENERGIA. **Energia fotovoltaica: manual sobre tecnologias, projecto e instalação**. Guarda/Portugal: Portal Energia, 2010. Disponível em: <<https://www.portal-energia.com/>>. Acesso em: 02 dez. 2020.
- PORTALSOLAR. **Estudo mostra que painéis solares de dupla face são mais eficientes**. Disponível em: <<https://www.portalsolar.com.br/blog-solar/energia-renovavel/estudo-mostra-que-paineis-solares-de-dupla-face-sao-mais-eficientes.html/amp>>. Acesso em: 24 fev. 2022.
- POWELL, J.W.; WELSH, J.M. **Integrating alternative energy: a farm case study at Emerald, QL**. Sidney: CottonInfo/AgEcon, 30p., 2019.

- RECA, J.; TORRENTE, C.; LUQUE, R.L.; MARTINEZ, J. Feasibility analysis of a standalone direct pumping photovoltaic system for irrigation in Mediterranean greenhouses. **Renewable Energy**, v.85, p. 1143-1154, 2016.
- RITCHIE, H. **The price of batteries has declined by 97% in the last three decade**. Our World in Data, 2021. Disponível em: <<https://ourworldindata.org/battery-price-decline#licence>>. Acesso em: 04 jun. 2021.
- RIZI, A.P.; ASHRAFZADEH, A.; RAMEZANI, A. A financial comparative study of solar and regular irrigation pumps: Case studies in eastern and southern Iran. **Renewable Energy**, v.138, p.1096-1103, 2019.
- ROSER, M. **Why did renewables become so cheap so fast?** Our World in Data, 2020. Disponível em: <<https://ourworldindata.org/cheap-renewables-growth>>. Acesso em: 04 jun. 2021.
- SANTANA, V.R.S.; OLIVEIRA, F.G.; MORAES, M.J.; REIS, J.B.R.S. Uso da energia solar fotovoltaica na agricultura irrigada. **Informe Agropecuário**, v.42, n.313, p. 79-90, 2021.
- SASS, J.; HAHN, A. **Solar powered irrigation systems (SPIS): technology, economy, impacts**. Eschborn: Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH, 184p., 2016.
- SCHMIDT, M.V.V.; BARTH, C. TESSLER, M.H.; OLIVEIRA, F.G.; REIS, J.B.R.; ARAUJO, M.S.P. Avanços tecnológicos dos equipamentos e emissores de irrigação. **Informe Agropecuário**, v.42, n.313, p.56-68, 2021.
- SENTELHAS, P.C. Variabilidade e mudanças climáticas no contexto agricultura irrigada. In: PAOLINELLI, A.; DOURADO NETO, D.; MANTOVANI, E.C. (Ed.) **Diferentes abordagens sobre agricultura irrigada no Brasil: técnica e cultura**. Piracicaba: ESALQ, p.195-213, 2021.
- TIMANÁ, W.R.P. **Generación de energía fotovoltaica y su utilización en sistema de bombeo para riego tecnificado, aplicando la guía PMBOK**, 119 p., 2019, Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental), Universidade Nacional de Piura, Peru.
- UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE (USDA)-NATURAL RESOURCES CONSERVATION SERVICE (NRCS). **Irrigation pumping plants**. Washington: USDA, 206p., 2016. (National Engineering Handbook, part 623 - Irrigation, chapter 8).
- VIANELLO, R.L.; ALVES, A.R. **Meteorologia básica e aplicações**. 1ed. Viçosa: UFV, 449p., 1991.
- VICK, B.D.; ALMAS, L.K. Developing Wind and/or Solar Powered Crop Irrigation Systems for the Great Plains. **Applied engineering in agriculture**, v.27, n.2, p.235-245, 2011.
- VICK, B.D.; CLARK, R.N. Determining the optimum solar water pumping system for domestic use, livestock watering or irrigation. In: ASES NATIONAL SOLAR CONFERENCE, 2009, Buffalo. **Proceedings ...** Buffalo: American Solar Energy Society, 2009.
- VILLALVA, M.G.; GAZOLI, J.F. **Energia solar conceitos e aplicações**. 1.ed. São Paulo: Érica/Saraiva, 2012.
- WELSH, J. **Solar pumping: economic and environmental rewards**. Sidney: CottonInfo, 2p., 2016
- ZIEGLER, M.S.; TRANCIK, J.E. Re-examining rates of lithium-ion battery technology improvement and cost decline. **Energy & Environmental Science**, v.14, p.1635-1651, 2021.