

Produção energética por sistemas fotovoltaicos em reservatórios hidrelétricos

Energetic production by photovoltaic systems in hydroelectric reservoirs

Lucas Antônio Brasil Gonçalves Lacerda Lacerda¹, Douglas Felipe Lucas², Marcelo Antônio Nero³, Patrícia Crisostomo Dupin⁴, Bráulio Magalhães Fonseca⁵, Lisete Celina Lange⁶

RESUMO: A crescente demanda energética desafia o setor a aumentar a oferta e diversificar fontes. Nesse sentido, a energia solar fotovoltaica se destaca como alternativa capaz de proporcionar relevante acréscimo à oferta de energia elétrica disponível a partir da geração de baixo impacto socioambiental. A complementaridade da geração por meio da inserção de fontes renováveis busca, também, a estabilização da oferta de energia anual. Este estudo teve objetivo de estimar a potencialidade complementar de produção de energia elétrica por sistemas fotovoltaicos flutuantes (FPV) em reservatórios hidrelétricos em operação da Cemig. Com a série histórica de geração hidrelétrica, a área do reservatório e sua localização geográfica dimensionou-se potenciais hídricos (PH) e solar (PSF). Considerou-se o PH como a média mensal da geração histórica levantada e o PSF como a estimativa da média mensal de geração de energia solar fotovoltaica. Após a determinação do PH e PSF, foi calculado o Potencial de Complementaridade (PC) de produção energética em períodos de redução de disponibilidade hídrica e quando a fonte solar fotovoltaica for capaz de complementar a geração. Verificou-se que o PC é viável em 3 das 45 usinas geradoras analisadas. A série histórica de geração hídrica e as premissas para o PSF podem ter contribuído para o baixo PC.

Palavras-chave: Aproveitamento. Eficiência. Energia.

ABSTRACT: The growing energy demand challenges the energy sector to increase energy supply and diversify sources. In this sense, photovoltaic solar energy stands out as a good alternative capable of providing a relevant increase in the supply of electricity available from the generation of low socio-environmental impact. The complementarity of generation through the insertion of renewable sources seeks, mainly, to stabilize the annual energy supply. This study aimed to estimate the complementary potential of electric energy production through floating photovoltaic systems (FPV) in hydroelectric reservoirs in operation at Cemig. With the historical series of hydroelectric generation, the reservoir area and its geographic location were dimensioned to the hydro (PH) and solar (PSF) potentials. The PH was considered as the monthly average of the surveyed historical generation and the PSF as the estimate of the monthly average of photovoltaic solar energy generation. After determining the PH and PSF, the Complementarity Potential (PC) of energy production was excluded in periods of reduced water availability and when the photovoltaic solar source stops capable of complementing the generation. It was found that PC is viable in 3 of the 45 generating plants analyzed. It is concluded that a historical series of water generation and as premises for the PSF may have contributed to the low PC.

Keywords: Efficiency. Energy. Use.

¹ Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais (PPGAMSA) da Universidade Federal de Minas Gerais– UFMG, Belo Horizonte (MG), Brasil.

² Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais (PPGAMSA) da Universidade Federal de Minas Gerais– UFMG, Belo Horizonte (MG), Brasil.

³ Professor Doutor/ Membro do Colegiado do Programa de Pós-graduação em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais (PPGAMSA) da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte (MG), Brasil.

⁴ Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos (DESA) da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte (MG), Brasil.

⁵ Laboratório de Geotecnologias, Centro de Pesquisa Manoel Teixeira da Costa GEOTECLAB/CPMTC/IGC/UFMG. Programa de Pós-Graduação em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais (UFMG), Belo Horizonte (MG), Brasil.

⁶ Professora Titular, Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – DESA Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte (MG), Brasil.

Autor correspondente: Lucas Antônio Brasil Gonçalves Lacerda
E-mail: lucas.abgl@gmail.com

Recebido em: 09/02/2021
Aceito em: 03/05/2021

INTRODUÇÃO

2

A crescente demanda energética devido ao crescimento vegetativo da população, o surgimento de novos consumidores através da expansão da rede e do aumento do poder aquisitivo da população, dentre outros fatores, desafia o setor energético a aumentar a oferta de energia e a diversificação das fontes de suprimento (TOLMASQUIM, 2012). Por ser considerada uma fonte abundante, renovável e de baixo custo, a maior parte da energia elétrica gerada no Brasil provém de usinas hidrelétricas (ANEEL, 2019). Correspondendo a 61,1% da matriz elétrica do país (MME, 2018), a maioria das usinas está concentrada na região Sudeste, onde está localizada a maior quantidade de consumidores e a maior concentração populacional. No entanto, as secas severas observadas nos últimos anos expuseram a enorme dependência do país em relação à hidroeletricidade.

Devido à necessidade da complementação do sistema elétrico brasileiro, fortemente concentrado na hidroeletricidade, aliada ao fato da luz solar ser uma fonte limpa e renovável, deve levar a energia solar a ganhar espaço na matriz de energia elétrica brasileira ao longo dos próximos anos (GUIMARÃES *et al.*, 2021).

A hidrogeração de energia elétrica depende das entradas de água ao ciclo hidrológico, fato diretamente relacionado às atuais mudanças climáticas, o que por sua vez afeta a produção de eletricidade brasileira. Assim, a produção predominante de energia hidrelétrica do Brasil tem sido cada vez mais complementada pela geração térmica para enfrentar o rápido crescimento da demanda, o lento planejamento e a construção de novas usinas, a redução proporcional da possível energia armazenada nos reservatórios e os períodos de seca maiores (GÉLIO; CÉSAR, 2021). Além de um custo de geração maior, a energia térmica ocasiona relevante impacto ambiental devido à queima dos combustíveis fósseis e consequentes emissões dos gases de efeito estufa (BONDARIK *et al.*, 2018).

Tem ocorrido grandes impactos ambientais em virtude da instalação de novas usinas hidrelétricas (MUNIZ; SANTOS, 2012). Ainda em relação aos diversos impactos ambientais causados, são identificados vários, entre estes, alteração da qualidade da água, ar e clima local, redução de cobertura vegetal nativa e alteração da dinâmica ecossistêmica e social. Por isso, estudos ambientais que analisam os impactos ambientais em decorrência da instalação de novos reservatórios devem apresentar melhores e mais completas análises (RIMA, 2009).

Diante desse contexto nota-se a necessidade da ampliação do uso de fontes de geração de energia limpas e renováveis a partir de um custo/benefício financeiro atraente. Nesse sentido,

a energia solar fotovoltaica se destaca como uma boa alternativa capaz de proporcionar relevante acréscimo à oferta de energia elétrica disponível no país a partir da geração de baixo impacto socioambiental (TEIXEIRA; RAMOS, 2021).

A utilização da energia solar fotovoltaica se torna cada vez mais interessante, sobretudo devido aos seguintes fatores: grandes evoluções na eficiência; redução dos custos de fabricação; ganhos de escala; incentivos e regulamentações, como a publicação da RN 482/12 (NASCIMENTO, 2015), que trata da mini e microgeração no Brasil e a elaboração do Programa de Desenvolvimento da Geração Distribuída de Energia Elétrica (ProGD); crescimento da demanda de energia elétrica motivada pela melhoria das condições de vida da população; de redução da oferta de outras fontes; e busca por uma maior segurança no suprimento energético em todo o mundo (STRANGUETO, 2016).

A irradiação solar no Brasil é favorável à geração de eletricidade. O potencial mínimo necessário para a instalação de sistemas fotovoltaicos planos sem concentração é de 2.000 kWh/m² por ano, ou seja, 5,5 kWh/m² por dia. No Brasil obtém-se o valor médio ponderado de 5,6 kWh.m² por dia, viabilizando, portanto, o emprego dessa tecnologia. O território mineiro possui regiões que apresentam tais requisitos de radiação. O Estado possui radiação solar global diária média anual entre 4,5 e 6,5 kWh/m² por dia (MINAS GERAIS, 2016).

As melhores localizações para instalação dos sistemas fotovoltaicos são preferencialmente próximas aos locais onde haja consumo, já que dessa forma ocorrem menores perdas entre o processo de geração e distribuição. Esses pontos são encontrados, na maioria das vezes, junto aos aglomerados urbanos, cujo valor do hectare é elevado, encarecendo o custo final de geração (SOUZA, 2015).

No meio rural, os sistemas fotovoltaicos concorrem principalmente com o uso da terra para agricultura e agropecuária. Fora essas áreas, locações potenciais podem ter condições especiais e limitadas de utilização, como unidades de conservação, reservas indígenas, quilombolas e áreas de proteção ambiental. Portanto, o incremento em grande porte e de forma centralizada do uso da energia solar fotovoltaica está associado à busca por grandes áreas de baixo custo e reduzidos impactos ambientais (STRANGUETO, 2016).

Todas as usinas hidrelétricas possuem reservatórios, os quais podem ser considerados como áreas interessantes ao aproveitamento de espaço superficial para a captação da energia solar fotovoltaica. Isso porque concentram grandes áreas próximas às subestações para a transmissão da energia produzida e apresentam menor custo de aquisição de áreas (TOLMASQUIM, 2012).

A operação coordenada de uma usina fotovoltaica com uma usina hidrelétrica (ligadas ao sistema elétrico através do mesmo ponto de conexão) pode aproveitar a capacidade da hidrelétrica de responder rapidamente às flutuações da energia solar fotovoltaica, compensando

a instabilidade da mesma em tempo real e permitindo sua inserção em larga escala no sistema elétrico (SILVA, 2016).

Por outro lado, a energia solar fotovoltaica pode complementar a geração hidrelétrica em períodos secos, além de aumentar a capacidade de atendimento à demanda de pico diária do sistema elétrico, reduzindo a possibilidade de acionamento das termoeletricas em períodos de estiagem, possibilitando assim, uma maior segurança no fornecimento de eletricidade (SILVÉRIO, 2018).

Os sistemas fotovoltaicos flutuantes (FPV) estão surgindo como um novo conceito em geração de eletricidade. A tecnologia é a mesma aplicada em projetos solares terrestres; a principal diferença é que no PV flutuante os painéis fotovoltaicos são colocados no topo de uma estrutura de polietileno ou outros materiais. A estrutura flutuante é então colocada em superfícies d'água. Os custos com alocação de terra podem ser minimizados junto da redução de problemas associados ao desmatamento e a perda de *habitat* (SILVA, 2019; EPE, 2020).

Além disso, o FPV pode produzir mais energia que os sistemas fotovoltaicos terrestres devido à evaporação na parte traseira dos painéis, o que ajuda para diminuir a temperatura das células fotovoltaicas, aumentando sua eficiência. Essa alternativa pode ser usada para evitar a perda de água em lagos e reservatórios (LOPES, 2020). Existem sistemas fotovoltaicos flutuantes sendo usados em lagos para agricultura e lagos de minas a céu aberto em todo o mundo (CHOI, 2014).

Há plantas de FPV experimentais bem-sucedidas instaladas em lagos em países como Coreia, Reino Unido, Estados Unidos da América (EUA), Itália, Japão, Espanha e Brasil (SILVA, 2018). Em estudo realizado com abordagem geoespacial no Estado do Colorado (EUA), identificou-se capacidade potencial de produção equivalente a 11GW por ano de geração com placas fotovoltaicas instaladas em 416 km² de superfícies de corpos de água (LIBER *et al.*, 2020).

A utilização simultânea de mais de uma fonte energética caracteriza um mecanismo de aumento da confiabilidade dos sistemas de geração e fornecimento de energia elétrica, dada a diminuição da suscetibilidade desses sistemas a fatores como a variação da disponibilidade sazonal de recursos energéticos. Esse tipo de estratégia é particularmente interessante no caso brasileiro, uma vez que a matriz energética nacional é predominantemente ancorada na hidroeletricidade, uma fonte cuja disponibilidade é sujeita a eventos que possuem caráter estocástico, como o clima e o regime de chuvas (SOUZA, 2015).

A complementaridade da geração por meio da inserção de fontes renováveis busca, principalmente, a estabilização da oferta de energia anual. Desse modo, a energia total gerada, ou energia assegurada, é alterada, de sorte que as diferenças entre os máximos e mínimos gerados ao longo do ano são diminuídas (SILVA, 2016).

Dessa forma, o presente trabalho busca levantar o potencial de complementaridade de produção de energia elétrica através de sistemas FPV em reservatórios de hidrelétricas em operação no território mineiro. Para tanto, foi realizado um levantamento de dados das usinas hidráulicas em operação em Minas Gerais de concessão da Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG). Empreendeu-se o cálculo do potencial de aproveitamento de energia solar para identificar as melhores áreas para locação de sistemas FPV.

Os dados citados anteriormente compreenderam as séries históricas de geração de energia hídrica, bem como a área dos reservatórios, relacionadas às suas respectivas localizações geográficas, obtidos então os potenciais hídrico e solar de cada usina avaliada. Após a determinação desses potenciais, calculou-se o potencial de complementaridade, identificando a potencialização e complementaridade alcançada por cada unidade.

A presente pesquisa busca auxiliar na tomada de decisões em projetos de geração de energia baseada em fontes renováveis, seja por agentes públicos ou privados.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

A área de estudo é o Estado de Minas Gerais, localizado na Região Sudeste do Brasil, possui 853 municípios, uma população de 19.597.330 habitantes e uma superfície de 586.852,35 km² (Figura 1). Faz divisa com os Estados de Goiás, São Paulo, Rio de Janeiro, Espírito Santo, Mato Grosso do Sul e Bahia. Apresenta clima tropical com inverno seco com subdivisões regionais, sobretudo em função da altitude, e variações entre tropical de altitude, tropical úmido, entre outros, além do clima semiárido que ocorre no extremo Norte e Nordeste mineiro, em função da baixa pluviosidade. A cobertura vegetal de Minas Gerais pode ser resumida em quatro tipos (biomas) principais: Cerrado, que aparece em 50% do Estado especialmente nas bacias dos rios São Francisco e Jequitinhonha; Mata Atlântica, com elevado índice pluviométrico; Campos de Altitude ou Rupestres, encontrado nos pontos mais elevados das serras da Mantiqueira, Espinhaço, Caparaó e Canastra; e Mata Seca que aparece no Norte do Estado, no vale do rio São Francisco. Diversos fatores, dentre eles, o clima, o relevo e as bacias hidrográficas, são predominantes na constituição da variada vegetação regional (MINAS GERAIS, 2019).

Minas Gerais possui um grande potencial hídrico. As principais bacias que compõem a rede hidrográfica do Estado são as do Rio Doce, Rio Grande, Jequitinhonha, Mucuri, Paraíba do Sul, Paranaíba, Pardo e São Francisco (SILVA, 2016). Esse potencial é explorado por 762 empreendimentos, gerando 20.818.141 kW de potência. Deste montante, 85,23% são provenientes de unidades geradoras hidráulicas, 12,2% usinas termelétricas e apenas 2,56% de central geradora solar fotovoltaica. Está prevista, para os próximos anos, uma adição

de 1.939.286 kW proveniente dos 2 empreendimentos atualmente em construção e mais 47 em construção não iniciada (ANEEL, 2019).

Ocupando a terceira posição entre as maiores geradoras do Brasil, a Cemig, através de suas subsidiárias integrais, controladas e coligadas de geração, possui em operação 65 usinas, sendo 59 hidrelétricas, três termelétricas e três eólicas, com 6.925 MW de capacidade instalada. No território mineiro, a geradora mantém 48 hidrelétricas, 96% da área de concessão, com cerca de 8 milhões de consumidores em 774 municípios (MINAS GERAIS, 2016).

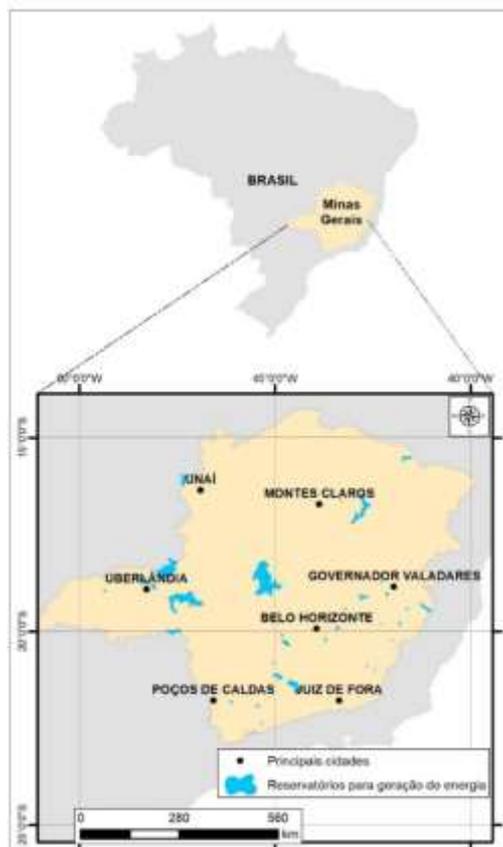


Figura 1. Mapa de localização dos principais reservatórios no Estado de Minas Gerais.
Fonte: Autoria própria (2021).

A energia solar fotovoltaica, tecnologia usada para converter a radiação solar em eletricidade, tornou-se uma tecnologia viável e ganhou popularidade em todo o mundo na última década. A concorrência internacional, com anos de aperfeiçoamento na fabricação, pesquisa e desenvolvimento, resultou em melhoria da eficiência dos módulos fotovoltaicos, redução de custos e aumento de produtividade (FEITOSA *et al.*, 2017).

A potência solar fotovoltaica instalada no mundo cresceu mais de 10 vezes de 2008 a 2015, atingindo 177 GWP instalados no final de 2015, sendo que 38,7 GWP desse total foram instalados apenas em 2014. No Brasil, também pode ser notado um rápido crescimento da aplicação da energia solar fotovoltaica. Em 2011, haviam seis empreendimentos desse tipo,

responsáveis pela potência fiscalizada de 1.087 kWp, ou seja, menos de 0,01% do potencial energético instalado no país. Já em 2015, podiam ser contabilizados 25 empreendimentos, responsáveis por 21.233 kWp de potência fiscalizada, ou seja, cerca de 0,02% do potencial instalado (JUCÁ, 2017).

Para estimar o quanto os sistemas conseguem gerar de energia solar fotovoltaica estuda-se a radiação solar incidente (H_t) no local da aplicação, obtendo-se a energia média diária, mensal ou anual no período, expressa comumente em kWh/m² por dia. A partir das características dos painéis utilizados e suas eficiências (n), pode-se determinar, então, a energia total média (E_{fot}) a ser produzida para um determinado tempo (dia, mês ou ano), para um ou uma quantidade determinada de painéis. A equação abaixo estima essa produção:

$$E_{\text{fot}} = n \cdot A \cdot H_t, \quad (\text{Equação 1})$$

onde n é a eficiência de conversão do painel fotovoltaico, A (m²) é a área realmente ocupada pelo material semicondutor e H_t é a radiação incidente no local estudado (INMET, 2019).

A radiação solar global é determinada pelos fatores astronômicos (por exemplo, declinação solar, insolação), por propriedades atmosféricas (incluindo nebulosidade, vapor de água e aerossol) e em menor medida pelas condições da superfície (uso da terra, sombreamentos, albedo e orografia). O fluxo solar radiativo que atinge a superfície da Terra é influenciado principalmente pela variabilidade espaço-temporal das nuvens. Por isso, a nebulosidade é o componente ativo do fluxo de radiação solar do sistema Terra-Atmosfera, refletindo cerca de 30% da radiação solar incidente para o espaço, reduzindo assim o balanço de energia da superfície.

É necessário se ter em mente que os sistemas fotovoltaicos flutuantes ainda estão em desenvolvimento e estudo. Dessa forma, não existe uma definição final sobre os formatos, configurações ou materiais mais apropriados para os flutuadores, bem como qual o melhor arranjo dos painéis, os quais operarão sobre oscilações constantes provocadas por ondas e ventos (JUCÁ, 2017).

A tecnologia FPV teve seu desenvolvimento iniciado em países onde há escassez de áreas disponíveis para construção de usinas fotovoltaicas em solo, devido à necessidade de utilização das terras para outras atividades produtivas (agricultura, pecuária, entre outros). Diante disso, foram realizados estudos visando aproveitar a superfície da água de açudes, lagos e reservatórios para geração de energia elétrica. As estruturas básicas de uma usina FPV são:

- Plataformas flutuantes: responsáveis pela flutuação e estabilidade dos painéis PV, cabos elétricos, passarela de manutenção e, eventualmente, as estações de transformação elétrica;
- Painéis PV convencionais: responsáveis pela captação da irradiação solar e sua transformação em energia elétrica;
- Sistema de ancoragem: responsável pela fixação da plataforma flutuante às margens ou ao fundo do reservatório. É o elemento que resiste aos esforços causados na plataforma por ações do vento e também permite que a mesma se adapte às variações do nível de água ao qual o corpo d'água é submetido;
- Cabos elétricos: responsável por conduzir a energia gerada até os demais equipamentos necessários para conexão à rede, tais como inversores, *string box* e subestação elevadora, os quais são instalados em terra (Figura 2) (SILVERIO, 2018).



Figura 2. Estruturas básicas dos sistemas fotovoltaicos flutuantes (FPV).
Fonte: Silvério (2018).

As vantagens e desvantagens desses sistemas flutuantes também se encontram em estudo, já que dependem do local onde serão aplicados. No entanto, através dos estudos já realizados, as vantagens apontadas estão nas menores temperaturas de operação devido à proximidade ou mesmo ao contato com a água (dependendo da estrutura e painéis utilizados) (LIU *et al.*, 2017); menor taxa de evaporação da água, o que deixa mais água nos reservatórios, permitindo uma maior geração de energia pelas hidrelétricas ou um maior volume de água que pode ser utilizado para o abastecimento de cidades, na irrigação de plantações e outras aplicações (REDÓN-SANTAFÉ, 2014); e menor proliferação de algas, devido à diminuição da penetração da luz nas águas e conseqüente diminuição da fotossíntese desse tipo de vegetação (SILVA, 2018).

As desvantagens listadas, nos trabalhos anteriores, são: dificuldade de acesso ao sistema; a necessidade de ancoragem adequada do arranjo, para que os painéis fiquem sempre voltados ao sol e para que as ondas não o movam; adequação da inclinação dos painéis para

que os ventos não gerem forças muito grandes no arranjo, que poderiam fazer os painéis saírem dos encaixes; e materiais com proteção adequada contra corrosão provocada pelo contato constante com a água (JUCÁ, 2017). Além disso, impactos ambientais como mortalidade de fauna, erosão, poluição visual e mudanças no microclima podem ser desencadeados. Existem também restrições ambientais e legais a serem observadas (área de segurança da usina hidrelétrica, áreas de preservação permanente). Por fim, devido aos usos múltiplos da água, como navegação, recreação e pesca, conflitos de interesse podem surgir.

Após levantamento das usinas da Cemig, baseadas em hidroeletricidade em operação em Minas Gerais, suas áreas de reservatório, localização geográfica (ANEEL, 2019b) e série histórica de geração (CEEE, 2019) procedeu-se ao cálculo dos potenciais.

A Figura 3 apresenta o fluxograma adotado. Nas caixas verdes estão representados os dados de entrada. As amarelas apontam os processos empregados e nas demais os resultados alcançados.

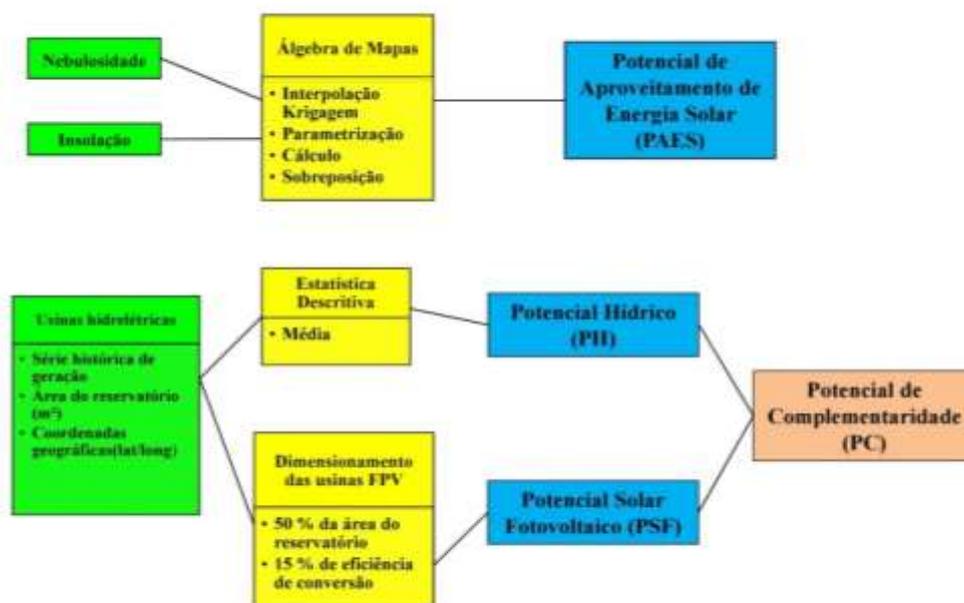


Figura 3. Fluxograma metodológico.
Fonte: Autoria própria (2021).

Para identificar o Potencial de Aproveitamento de Energia Solar (PAES) foi empreendido procedimento de análise espacial conhecida como "álgebra de mapas". Esse

procedimento visa à produção de novos dados, a partir da manipulação aplicada a um ou mais mapas (BARBOSA, 1998). De posse das médias anuais de insolação e nebulosidade das estações meteorológicas do INMET (2019), foram interpoladas imagens para as duas variáveis ambientais.

A interpolação consiste na estimativa e aproximação de valores desconhecidos, tendo como base uma função inicial definida pela distância entre pontos. Neste trabalho utilizou-se o método da krigagem, pois os pontos amostrais estavam distribuídos irregularmente por toda a área de estudo. A krigagem engloba um vasto conjunto de métodos de estimação e nesse projeto optou-se pela utilização do método da krigagem ordinária. Este é um método interpolador exato no sentido de que, quando as equações de combinação linear e de estimador não tendencioso forem utilizadas, os valores interpolados irão coincidir com os valores dos pontos amostrais (SILVA *et al.*, 2007).

As imagens das variáveis foram parametrizadas, ou seja, colocadas numa escala unitária de 0 a 100. Posteriormente, efetuou-se o cálculo da equação 2, sendo o resultado novamente parametrizado, obtendo-se o PAES.

$$\text{PAES} = (2. \text{Insolação}) + (1. \text{Nebulosidade}) / 3. \quad (\text{Equação 2})$$

Através de operações de sobreposição, também procedimento de análise espacial, foram identificados os valores de PAES para cada usina analisada. Esses procedimentos foram realizados no *software* SIG ArcMAP 10.0.

De posse das séries históricas de geração (biênio 2017-2018) das usinas (CCEE, 2019), considerou-se o Potencial Hídrico (PH) sazonal como a média mensal da geração histórica levantada. Foram eliminadas da análise as usinas que apresentaram inexistência de produção por mais de 6 meses.

Para a estimativa da média mensal de geração de energia solar fotovoltaica, aqui tratada como o Potencial Solar Fotovoltaico (PSF), realizou-se o dimensionamento de sistemas FPV por meio do *software* Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS) (JRC, 2017). Essa ferramenta interativa possui um banco de dados de radiação solar para o globo baseado em imagens de satélite, permitindo a estimação de geração de energia solar fotovoltaica ligada a um sistema elétrico. Foram fornecidas como entradas as latitudes e longitudes das hidrelétricas analisadas e a potência instalada, definida a partir da premissa de que a usina solar projetada irá ocupar 50% da área total do reservatório (JARDIM *et al.*, 2004) e os painéis empregados possuem eficiência de conversão de 15%, de acordo com dados de 2019 da plataforma Portal Solar.

A exclusão das demais áreas foi em virtude das restrições impostas pela área de segurança (proximidades às tomadas d'água, vertedouros e sistemas ancilares, áreas de manobras de equipamentos, etc.), bem como um afastamento mínimo das margens, devido à presença de vegetação, sombreamentos, instalações diversas e a própria segurança dos painéis. Ponderou-se ainda a necessidade de uma área de aeração do reservatório, imprescindível para a preservação dos processos biológicos presentes que dependem do oxigênio do ar (STRANGUETO, 2016).

Para as demais opções do programa optou-se pela manutenção das configurações padrões, excetuando a inclinação (*Slope*) e orientação (*Azimuth*) dos painéis. Foi selecionada a inclinação de 0° e azimute de 180°, portanto os painéis estão paralelos à superfície d'água e orientados para o Norte geográfico.

Realizadas as simulações obteve-se, a partir do *software*, uma média mensal de geração de energia elétrica para cada usina FPV projetada. A Figura 4 ilustra o processo de simulação e os resultados obtidos.

Por fim, o Potencial de Complementaridade (PC) foi calculado considerando-se que a complementaridade ocorre quando nos meses em que a geração da fonte principal (hídrica) encontra-se com valor abaixo da média, e a fonte solar fotovoltaica for capaz de garantir a geração, impedindo o máximo possível que a energia firme diminua. Nos casos em que não se verifica a complementaridade conforme exposto, verifica-se a potencialização das usinas, que corresponde a um acréscimo na energia gerada.

A potencialização de cada usina é dada pela relação percentual entre a energia solar fotovoltaica gerada e a energia hídrica gerada. A complementaridade é dada pelo produto entre a repotencialização e a razão entre os meses em que se verificou complementaridade e o total de meses do ano. As equações a seguir definem o potencial de complementaridade (SILVA, 2016):

$$\text{Repotencialização} = (\text{Energia solar fotovoltaica}/\text{Energia hídrica}) / 100 \quad (2)$$

$$\text{PC} = (\text{Repotencialização} \cdot 100) \cdot n_{\text{comp}} / 12, \quad (3)$$

onde n_{comp} é o número de meses com complementaridade verificada.

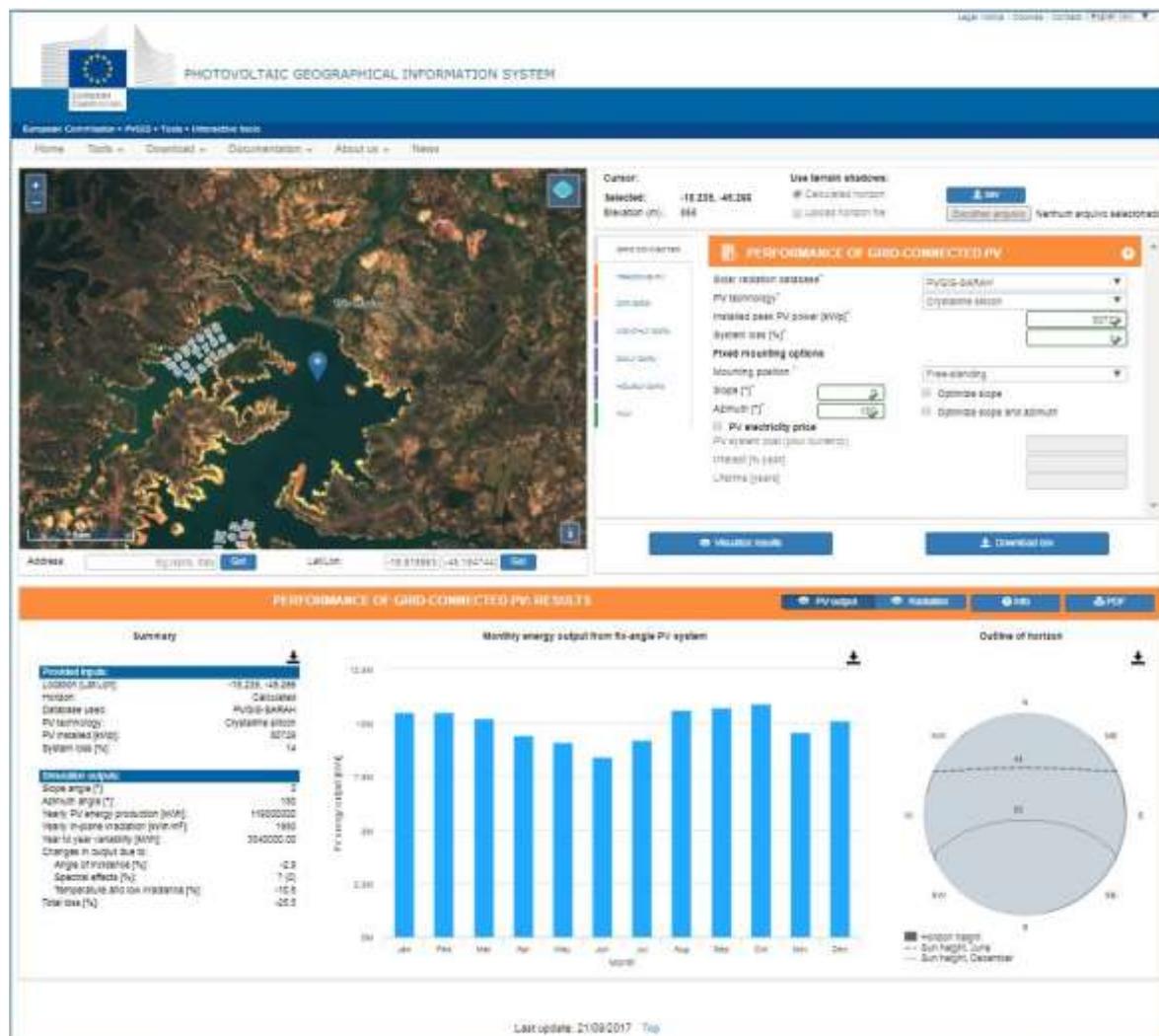


Figura 4. Resultado de uma simulação no PVGIS.
Fonte: PVGIS - European Commission Joint Research Centre.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foram analisados e gerados os potenciais para 45 usinas geradoras da Cemig. Destas, 5 são centrais geradoras hidrelétricas (CGHs), 22 pequenas centrais hidrelétricas (PCHs) e 18 usinas hidrelétricas de energia (UHEs).

Nota-se, conforme a Figura 5, que os valores máximos ocorrem na região Norte de Minas Gerais e os mínimos na região Sudeste. Isso se deve às áreas de maior altitude (Serra do Caparaó, Mantiqueira e Espinhaço) da Região Sudeste reterem a nebulosidade oriunda do oceano, diminuindo a radiação solar. As regiões Norte e Nordeste são caracterizadas pelo clima semiárido, que inibe a formação de nuvens, propiciando maiores índices de radiação.

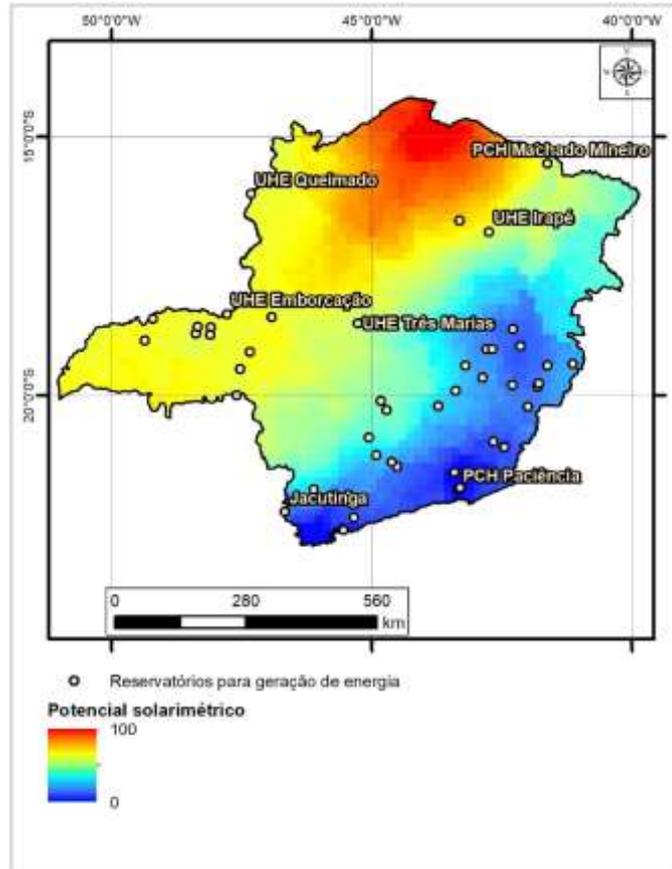


Figura 5. Resultado do PAES.
Fonte: Autoria própria (2021).

Para as usinas analisadas foi observado padrão semelhante. Apresentando um valor médio de 36,90, os 3 menores valores ocorreram na região Sudeste do Estado (PCH Piau - 7,8, PCH Paciência - 8,44 e PCH Joasal - 9,48). Concentrados na região do Triângulo, estão 3 maiores valores (PCH Salto Morais - 66,54, UHE Emborcação - 66,03 e UHE Nova Ponte - 65,57).

O PH demonstra que as usinas tiveram uma média de 19.487,75 MWh de energia hídrica gerada, somando 876.948,80 MWh ao sistema elétrico brasileiro no período analisado. A produção mensal segue a distribuição da precipitação do clima tropical com inverno seco. Nos meses de novembro a abril, a produção apresenta valores médios maiores (21.563,51 MWh), devido à estação chuvosa do verão. Nos meses de maio a outubro, a produção média cai (17.412,00 MWh), pela estação seca no inverno.

No período analisado, as maiores produções médias foram das UHE Emborcação, Nova Ponte e Amador Aguiar I. As menores ocorreram nas CGHs Pissarão e Lages e PCH Sinceridade. Nota-se que estes valores não encontraram coincidência com as áreas dos reservatórios. Por exemplo, o maior reservatório é da UHE Três Marias (108.432,85 ha), mas

esta obteve a 7ª colocação das maiores médias de produções. Podemos suscitar, portanto, que algumas usinas estão em déficit hídrico que impactam em sua produção.

O PSF aponta uma estimativa média mensal de 491,81 MWh de produção de energia elétrica, podendo acrescentar 22.131,61 MWh anuais ao sistema elétrico nacional, valor próximo à produção hídrica da UHE Porto Estrela (21.558,45 MWh), sendo que esta geração solar fotovoltaica proposta reduziria em até 137 mil kg de CO₂ lançados na atmosfera (JRC, 2017).

A produção de energia solar fotovoltaica seguiu um comportamento análogo ao da produção hídrica. Nos meses de novembro a abril, a produção apresenta valores médios maiores (506,92 MWh), pela maior insolação típica do verão. Nos meses de maio a outubro, a produção média cai (476,21 MWh), devido à menor disponibilidade de radiação solar no inverno.

As maiores produções de energia solar fotovoltaica foram estimadas para as UHE Três Marias, Emborcação e Nova Ponte. As menores são apontadas para as CGH Sumidouro e Lages e PCH Luiz Dias. Esses valores são diretamente proporcionais às áreas dos reservatórios das usinas analisadas. Portanto, a área útil para implantação das usinas FPV foi variável relevante neste trabalho.

Com os resultados do PH e PSF, obteve-se o PC. A complementaridade de produção de energia elétrica ocorreu em apenas 3 usinas das 45 analisadas: GCH Pissarão (0,05%), PCH Xicão (0,34%) e UHE Cajuru (4,84%). A repotencialização acontece em todas as usinas, gerando uma média de 1,70%.

Nota-se que a repotencialização e complementaridade são maiores nos meses de inverno e menores dos meses de verão. Esse padrão se deve ao maior déficit hídrico das usinas no inverno, o que ocasiona o arrefecimento da produção de energia hídrica, contribuindo para a maior potencialização dos sistemas fotovoltaicos.

Apesar de não apresentar complementaridade, a UHE Três Marias destacou-se com uma repotencialização média de 20%. Por possuir o maior reservatório dentre as usinas analisadas, a UHE Três Marias apresentou a maior potência de energia fotovoltaica e por consequência a maior produção média anual estimada, 80.729 kWp e 9.730 MWh respectivamente. A Tabela 1, a seguir, expõe os resultados médios anuais dos potenciais analisados.

Tabela 1. Resultados dos potenciais médios anuais

Usinas	PAES	PI (MWh)	PSF (MWh)	PC (%)
UHE Cajuru	45,89	1.049,39	203,00	4,84
PCH Xicão	22,34	233,21	9,55	0,34
CGH Pissarrão	65,17	36,31	0,24	0,05
CGH Sumidouro	21,97	687,07	0,11	-
PCH Cor.Domiciano	17,49	1.268,04	0,21	-
PCH Joasal	9,48	2.918,37	0,72	-
PCH Pai Joaquim	63,69	7.304,85	2,47	-
PCH Piau	7,14	6.505,19	2,47	-
PCH Martins	63,88	1.155,06	0,72	-
UHE Sá Carvalho	29,67	23.129,23	14,40	-
PCH Marmelos	9,48	818,75	0,52	-
PCH Cachoeirão	24,17	8.958,73	6,00	-
PCH Luiz Dias	21,64	134,68	0,11	-
PCH São Bernardo	12,06	2.035,67	1,67	-
CGH Jacutinga	25,01	407,51	0,34	-
CGH Anil	41,25	791,53	0,68	-
PCH Pipoca	24,77	6.510,67	5,76	-
UHE Itutinga	28,78	11.902,91	15,80	-
UHE Porto Estrela	27,21	21.558,45	31,60	-
CGH Lages	65,34	71,64	0,12	-
UHE Salto Grande	26,28	27.818,34	50,20	-
PCH Ervália	17,73	948,05	1,76	-
UHE Baguari	19,88	30.026,47	58,10	-
UHE Amador Aguiar I	64,55	80.332,02	157,00	-
PCH Paciência	8,44	1.111,24	2,67	-
PCH Tronqueiras	20,75	1.295,17	5,29	-
PCH Neblina	24,77	548,49	2,47	-
UHE Amador Aguiar II	64,37	70.222,49	333,00	-
UHE Aimorés	29,68	51.733,61	250,00	-
PCH Dona Rita	33,56	347,48	1,88	-
PCH Poço Fundo	35,94	4.074,83	23,40	-
UHE Funil	35,73	40.900,71	243,00	-
UHE Igarapava	62,96	69.464,51	429,00	-
PCH Salto Morais	66,54	488,96	4,25	-
PCH Sinceridade	25,02	55,85	0,52	-
PCH Gafanhoto	48,46	2.296,15	21,20	-
PCH Rio de Pedras	35,26	1.089,32	13,30	-
UHE Queimado	61,90	20.531,16	329,00	-
UHE Peti	33,38	2.643,16	48,70	-
UHE Irapé	61,74	44.639,99	1.150,00	-
UHE Emborcação	66,03	162.685,80	4.330,00	-
PCH Paraúna	42,84	709,44	19,40	-
UHE Nova Ponte	65,57	107.683,75	4.000,00	-
UHE Camargos	25,28	9.166,98	631,00	-
UHE Três Marias	57,59	48.657,56	9.730,00	-
Total		876.948,80	22.131,61	

Os resultados dessa pesquisa procuraram estimar o potencial de complementaridade de produção de energia elétrica através de sistemas FPV em reservatórios de hidrelétricas em operação da Cemig no Estado de Minas Gerais. Para tanto, utilizou-se ferramenta gratuita e disponível via *Web*, o que facilita o campo da área científica e o acesso. Essa pode ser caracterizada como a maior contribuição inovadora nesse artigo.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho permitiu avaliar o potencial estratégico da geração de energia baseada em fontes renováveis complementares para o Estado de Minas Gerais através das usinas da Cemig. São destacadas as vantagens estratégicas advindas da diversificação da matriz estadual elétrica por meio do consorciamento de fontes renováveis. Tais vantagens estão representadas pelo aproveitamento de um vasto potencial disponível, pelo ganho em termos de segurança do suprimento, pelo pioneirismo técnico-ambiental e pelo ganho econômico, dada a possibilidade de utilização conjunta de infraestrutura pré-existente.

Constatou-se que a complementaridade é possível em poucas usinas geradoras, 3 das 45 analisadas. No entanto, a repotencialização pode trazer ganhos significativos para o sistema elétrico integrado equivalendo à produção de uma UHE.

Conforme observado, o período curto da série histórica de geração hídrica analisado pode ter influência no PH encontrado e no PC derivado. As premissas para o PSF também podem ter contribuído para o baixo PC. No entanto, o estudo aqui proposto é exploratório e busca auxiliar os agentes envolvidos no setor energético nacional nas ações de planejamento e gestão das fontes renováveis de energia. A construção de sistemas de FPV requer estudos específicos sobre o local de implantação, principalmente sobre os possíveis impactos socioambientais decorrentes.

5 AGRADECIMENTOS

Agradecemos à CAPES pela concessão de bolsa de pesquisa, à Cemig pela disponibilização e autorização da divulgação dos dados. Ao colega Cristiano Lisboa pela ajuda e compartilhamento de conhecimentos e aos colegas da disciplina Geoprocessamento Avançado com Ênfase em Meio Ambiente do Programa de Pós-Graduação em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais pelas discussões e contribuições durante a elaboração deste trabalho.

REFERÊNCIAS

ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Banco de Informações de Geração**. 2019. Acesso em: 20 out. 2020.

ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **SIGEL**: Sistema de Informações Georreferenciadas do Setor Elétrico. 2019b. Disponível em: <https://sigel.aneel.gov.br/portal/home/index.html>. Acesso em: 20 out. 2020.

BARBOSA, C. C. *et al.* Operadores Zonais em Álgebra de Mapas e sua Aplicação a Zoneamento Ecológico Econômico. *In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO*, 9., 1998, Santos. **Anais [...]**. Santos: INPE, 1998, p. 487-500. Acesso em: 20 jun. 2020.

BONDARIK, R.; PILATTI, L. A.; HORST, D. J. Uma visão geral sobre o potencial de geração de energias renováveis no Brasil. **Interciencia**, v. 43, n. 10, p. 680-688, 2018. Acesso em: 22 jun. 2020.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Resenha Energética Brasileira**. Exercício 2018. Edição de Maio de 2019. Acesso em: 15 jan. 2020.

CÂMARA DE COMERCIALIZAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA (CCEE). **Boletim InfoMercado Mensal**. 2019. Disponível em: https://www.ccee.org.br/portal/faces/pages_publico/o-que-fazemos/infomercado. Acesso em: 20 jun. 2020.

CEMIG. **Atlas Solarimétrico de Minas Gerais**. v. 2. Belo Horizonte: Editora Futura Express, 2016. Disponível em: <https://www.cemig.com.br/wp-content/uploads/2021/03/atlas-solarimetrico-vol-ii-mg.pdf>. Acesso em: 22 jun. 2020.

CEMIG. **Usinas e Reservatórios da Cemig**. 2019. Disponível em: <https://www.cemig.com.br/usinas/>. Acesso em: 15 jan. 2020.

CHOI, Y.-K. A Study on Power Generation Analysis of Floating PV System Considering Environmental Impact. **International Journal of Software Engineering and Its Applications**, v. 8, n. 1, p. 75-84, 2014. Acesso em: 22 jun. 2020.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Expansão da Geração: Solar Fotovoltaica Flutuante - Aspectos Tecnológicos e Ambientais relevantes ao Planejamento**, 2020. Acesso em: 22 jun. 2020.

EUROPEAN COMMISSION JOINT RESEARCH CENTRE. **Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS)**. 2017. Disponível em: <https://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis.html>. Acesso em: 22 jun. 2020.

FEITOSA, F. E. C. S. *et al.* Influência das Mudanças de Tempo e Variabilidade Climática sobre a Produção de Energia Fotovoltaica no Estado do Maranhão (*Climate Risk for Photovoltaic Energy Production in the state of Maranhão*). **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 10, n. 6, p. 1959-1973, 2017. Acesso em: 22 jun. 2020.

GÉLIO, L. G.; CÉSAR, F. I. G.. Energia Solar: um estudo sobre o futuro da geração de energia elétrica. **Revista Científica Acertte**, v. 1, n. 5, p. e1534-e1534, 2021.

GUIMARÃES, E. C. *et al.* Energia solar paradigmas e geração de resíduos. **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 6, p. 59923-59940, 2021.

INMET - Instituto Nacional de Meteorologia. **Normais climatológicas do Brasil 1981-2010**. 2019. Acesso em: 22 jun. 2020.

18

JARDIM, C. S *et al.* O potencial dos sistemas fotovoltaicos interligados à rede elétrica em áreas urbanas: dois estudos de caso. *In*: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 5., Campinas. **Proceedings online** [...] 2004. Disponível em: http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=MSC0000000022004000200029&lng=en&nrm=abn. Acesso em: 22 jun. 2020.

LIBER, W. *et al.* **Potential study for the implementation of floating solar photovoltaic arrays**, Colorado Energy Office, Denver, CO, 2020. Disponível em: <https://drive.google.com/file/d/1PjrwsUeXyqNyW7xBBvcZyxTRT8aB19N3/view>. Acesso em: 25 jan. 2021.

LIU, L. *et al.* Power generation efficiency and prospects of floating photovoltaic systems. **Energy Procedia**, v. 105, p. 1136-1142, 2017.

LOPES, M. P. C. **Usinas fotovoltaicas flutuantes como alternativa para a geração de energia e redução da evaporação em açudes do semiárido brasileiro**. 2020. 131f. Tese (Doutorado). COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2020.

MINAS GERAIS. **Dados Gerais**. 2019. Disponível em: <https://www.mg.gov.br/conteudo/conheca-minas/geografia/dados-gerais>. Acesso em: 22 jun. 2020.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Resenha Energética Brasileira**. Exercício 2018. Edição de maio de 2019. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/documents/1138787/1732840/resenha+energ%C3%A9tica+brasileira+-+edi%C3%A7%C3%A3o+2019+v2.pdf/66a837a8-4164-4b37-be4a-59a5ad270c50?version=1.0>. Acesso em: 22 jun. 2019.

MUNIZ, L. S.; SANTOS, E. C. A gestão participativa em estudos prévios de impacto ambiental de usinas hidroelétricas na Amazônia. **Revista Geonorte**, Manaus, v. 3, n. 4, p. 12-23, maio 2012.

NASCIMENTO, A. S. **Energia Solar Fotovoltaica: estudo e viabilidade no Nordeste brasileiro**. 2015. 145f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Produção, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa. Disponível em: <https://repositorio.ufpb.br/jspui/bitstream/tede/8153/2/arquivototal.pdf>. Acesso em: 20 jan. 2021.

PORTAL SOLAR. **Tudo sobre a Eficiência do Painel Solar**. 2019. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/tudo-sobre-a-eficiencia-do-painel-solar.html>. Acesso em: 15 jan. 2020.

REDÓN-SANTAFÉ, M. *et al.* Implementation of a photovoltaic floating cover for irrigation reservoirs. **Journal of cleaner production**, v. 66, p. 568-570, 2014.

RELATÓRIO DE IMPACTO AMBIENTAL (RIMA). **Aproveitamento Hidrelétrico Colíder – 300 MW**. 2009. Disponível em: [https://www.copel.com/uhecolider/sitearquivos2.nsf/arquivos/rima/\\$FILE/RIMA.pdf](https://www.copel.com/uhecolider/sitearquivos2.nsf/arquivos/rima/$FILE/RIMA.pdf). Acesso em: 02 out. 2021.

SILVA, G. D. P. **Large-scale solar photovoltaic impact assessment in the context of the Brazilian environmental and energy planning**. 2019. 104f. Dissertação (Mestrado) - Ciências em Planejamento Energético, Faculdade de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2019.

SILVA, L. M. L. **Modelagem para estimativa do potencial de complementariedade hidro eólico solar para matriz elétrica de Minas Gerais - Relatório 2**. Belo Horizonte: FEAM, 2016. Acesso em: 20 jun. 2020.

SILVA, S. A. B. *et al.* Comparação de estimativas de radiação solar fornecidas por interpolação Kriging de dados de superfície e por modelo físico alimentado com dados de satélite. *In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO*, 13., 2007, Florianópolis. **Anais [...]**. Florianópolis: INPE, 2007. p. 4241-4248. Acesso em: 20 jun. 2020.

SILVÉRIO, N. M. **Utilização de usinas solares flutuantes para operação coordenada com centrais hidrelétricas: estudo de caso das hidrelétricas da bacia do rio São Francisco**. 2018. 133f. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia de Energia, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2018.

SOUZA, R. G. D. **Modelagem para estimativa do potencial de complementariedade hidro eólico solar para a matriz elétrica de Minas Gerais (2015 - 2050) - Relatório**. Belo Horizonte: FEAM, 2015.

STRANGUETO, K. M. **Estimativa do potencial brasileiro de produção de energia elétrica através de sistemas fotovoltaicos flutuantes em reservatórios de hidroelétricas**. 2016. 147f. Tese (Doutorado) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2016.

TEIXEIRA, M. A. C.; RAMOS, H. R. Perspectivas de Novos Materiais Alternativos ao Silício para a produção de células solares fotovoltaicas: uma revisão sistemática da literatura. *In: SIMPÓSIO BRASILEIRO ONLINE DE GESTÃO URBANA*, 5., 2021. **Anais [...]**. ANAP, 2021. p. 981-995. Acesso em: 07 dez. 2020.

TOLMASQUIM, M. T. Perspectivas e planejamento do setor energético no Brasil. **Estudos Avançados [online]**. 2012, v. 26, n. 74, p. 247-260. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0103-40142012000100017>.