

ESTIMATIVA DO POTENCIAL TEÓRICO DE INSTALAÇÃO E DE GERAÇÃO DE ENERGIA POR SISTEMAS FOTOVOLTAICOS FLUTUANTES EM RESERVATÓRIOS DE HIDRELÉTRICAS NO BRASIL

Márcia da Rocha Ramos – marciar@cepel.br

Pablo de Abreu Lisboa

Leonardo dos Santos Reis Vieira

José Carlos de Souza Guedes

Ana Paula Cardoso Guimarães

Aroldo José Viana Borba

Centro de Pesquisas de Energia Elétrica, CEPEL

4.3. Aspectos técnicos de sistemas fotovoltaicos instalados

Resumo. Este artigo apresenta uma estimativa do potencial de instalação e de geração de energia elétrica em reservatórios de usinas hidrelétricas no Brasil, por meio da utilização de sistemas fotovoltaicos flutuantes (SFFs). A metodologia empregada utilizou como base simulações de sistemas fotovoltaicos realizadas no software PVsyst. As estimativas foram realizadas considerando áreas ocupadas pelos sistemas flutuantes de 1%, 5% e 80% da superfície dos reservatórios em suas cotas mínimas de operação. Os potenciais foram avaliados para cada subsistema do Sistema Interligado Nacional (SIN), para cada bacia hidrográfica e por tipo de usina, a fio d'água ou com armazenamento. A estimativa do potencial total de instalação e de geração de energia para todos os reservatórios foi de 3.284,2 GWp e de 5.269,2 TWh/ano, respectivamente. O subsistema com maior potencial foi o Sudeste/Centro-oeste, responsável por cerca de 66% do total. O potencial em UHE com armazenamento é de aproximadamente 58% do potencial total. Na estimativa realizada neste trabalho não foram incluídas possíveis restrições físicas, socioambientais, de operação e regulatórias para a implantação dos SFFs.

Palavras-chave: Sistema Fotovoltaico Flutuante, Potencial Teórico

1. INTRODUÇÃO

As crises hídricas são recorrentes na história. Desde 2001, com o apagão energético, vem-se apostando no uso de térmicas como forma de complementar a geração hídrica, reforçando a segurança energética. Em 2017, a matriz energética possuía cerca de 91% do parque gerador formado por geração hídrica e térmica (Aneel, 2017). Esta última, apesar de fornecer estabilidade ao sistema elétrico, agrega consideráveis níveis de emissão de carbono. Já a construção de novas hidrelétricas, embora permita a geração com baixa emissão de carbono, possui atualmente grandes entraves para obtenção de licenciamento devido aos elevados impactos socioambientais. A instalação de sistemas fotovoltaicos flutuantes em reservatórios de usinas hidrelétricas (UHEs) é uma alternativa para o aumento da geração renovável de energia com reduzido impacto ambiental, possibilitando a economia de água dos reservatórios, pela sua geração associada à da hidrelétrica e também pela redução da taxa de evaporação. Na geração fotovoltaica há ganho de eficiência em função da menor temperatura de operação e redução de perda por poeira (EPE, 2020). Além disso, por estarem interligados ao sistema elétrico da hidrelétrica, podem aproveitar a sua estrutura, apresentando a vantagem adicional de redução dos custos de conexão.

A energia solar fotovoltaica tem sido a fonte energética com o maior crescimento no mundo, alcançando 1.185 GW de capacidade instalada em 2022 (REN21, 2023). Esta tecnologia apresenta ainda um potencial para redução de custos (EPE, 2016). Nos últimos anos, a geração solar fotovoltaica flutuante vem experimentando rápido crescimento, com taxa de 20,6% entre 2019 e 2021 (Zilong *et al.*, 2023) e já possui mais de 3 GW de potência instalada no mundo (IEA, 2022). Avaliações realizadas estimam um potencial global de desenvolvimento entre 3 e 7,6 TW de capacidade com a instalação de SFFs (Lee *et al.*, 2020). Em muitas usinas hidrelétricas com grandes reservatórios, é possível dobrar a capacidade instalada da usina, com pequenas porções ocupadas com painéis fotovoltaicos, da ordem de 3 a 4% da área total (Banco Mundial, 2018). Um estudo recente na Espanha revelou um potencial de suprir 31% da demanda de energia elétrica cobrindo-se 10% de todos os corpos d'água do país (López *et al.*, 2022).

Com um elevado número de hidrelétricas de grande porte espalhadas por todo o território e índices elevados de irradiação solar global, o Brasil apresenta um enorme potencial para a aplicação de SFFs. Segundo Jin *et al.* (2023), o Brasil está entre os cinco principais países com o maior potencial de geração de energia fotovoltaica flutuante (completam o grupo os EUA, a China, a Índia e o Canadá). Estudos recentes levantaram o potencial em parte dos corpos d'água do Brasil, como na bacia Apodi-Mossoró, no Rio Grande do Norte (Lopes, 2020), bem como nos maiores reservatórios no estado do Paraná (Neves *et al.*, 2018). Outro trabalho avaliou a viabilidade de instalação de SFFs em

reservatórios de UHEs da bacia do Rio São Francisco, considerando a operação coordenada (Silverio, 2018). Quanto ao território nacional, um estudo de 2016 sobre a estimativa do potencial brasileiro de produção de energia elétrica com sistemas flutuantes mostrou uma capacidade de produção anual de energia elétrica de 4.443 TWh (Strangueto, 2016). Este trabalho considerou as usinas de acumulação com reservatórios iguais ou superiores a 0,01 km² e 80% de ocupação da área dos reservatórios. No entanto, dependendo do histórico de chuvas, é possível que os reservatórios atinjam grandes variações de nível, de forma que a área da superfície do espelho d'água reduza para percentuais menores do que 80%, o que não foi considerado em Strangueto (2016). Além disso, foi observado nos últimos anos um avanço significativo no desempenho dos módulos fotovoltaicos. Neste sentido, é recomendável uma reavaliação do levantamento do potencial de geração com o uso de sistemas fotovoltaicos flutuantes nos reservatórios brasileiros, objeto deste trabalho. Este trabalho considerou módulos de alta performance disponíveis atualmente no mercado e restrição de área de superfície na cota mínima de operação das UHEs. Como resultado, são identificadas as usinas, os subsistemas e as bacias hidrográficas com maior potencial de geração por SFF e o potencial do conjunto de usinas com reservatórios a fio d'água e do conjunto de usinas com reservatórios para armazenamento.

2. METODOLOGIA

A estimativa do potencial teórico de geração de energia elétrica por sistemas fotovoltaicos flutuantes consistiu nas atividades a seguir e são detalhadas nas seções 2.1 a 2.5:

- Levantamento de informações dos reservatórios para instalação de SFFs;
- Definição de critérios a serem adotados para estimativa do potencial teórico;
- Obtenção dos dados meteorológicos referentes à localização de cada reservatório;
- Modelagem de um arranjo de referência e simulações no PVsyst para cada reservatório;
- Estimativa do potencial teórico de cada reservatório e total para cada subsistema, para cada bacia hidrográfica, para usinas com reservatórios a fio d'água e usinas com reservatórios para armazenamento.

A Fig. 1 mostra o fluxograma ilustrando a metodologia empregada.

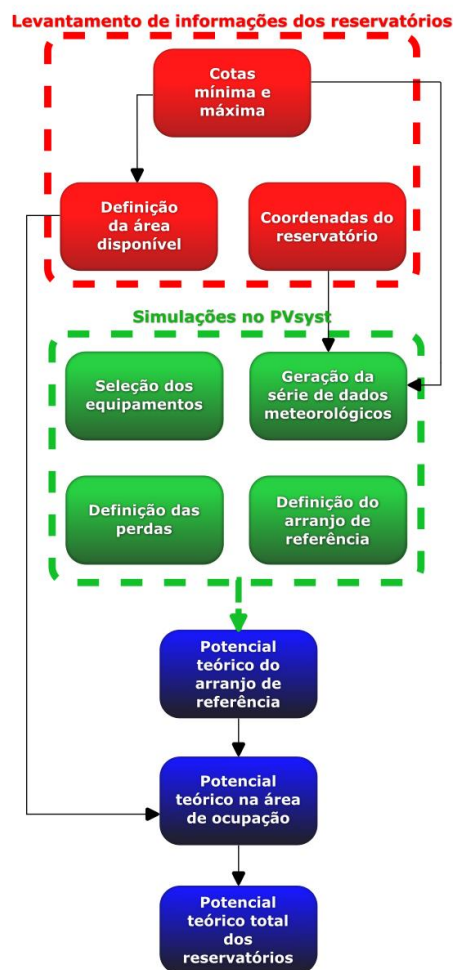


Figura 1 – Fluxograma da metodologia empregada.

2.1 Levantamento de informações dos reservatórios das hidrelétricas para instalação de SFFs

O levantamento das informações dos reservatórios para instalação de SFFs foi realizado com base nas seguintes fontes de dados:

- Arquivo disponibilizado na página do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS)

Na página do ONS (2023) encontra-se disponível uma seção de dados abertos contendo uma relação dos reservatórios das UHEs do SIN e dados como: subsistema, bacia, tipo de reservatório, coordenadas geográficas etc.

- Arquivos disponibilizados na página da Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE)

Na página da CCEE (2023) é possível baixar o arquivo de *deck* de dados do programa Newave que contém o arquivo 'Hidr.dat', codificado. Neste arquivo, para cada reservatório são disponibilizados os coeficientes das curvas cota x área x volume (CAV), bem como os valores de cota mínima e cota máxima de operação. As informações foram obtidas utilizando-se o programa Hidroview.

- Arquivos disponibilizados na página do Sistema de Informações de Geração da Agência Nacional de energia Elétrica (SIGA Aneel)

Na página do SIGA - Aneel (2023) é possível obter os dados cadastrais das usinas hidrelétricas do sistema interligado que contém, entre outras, a potência outorgada das usinas.

2.2 Definição de critérios a serem adotados para estimativa do potencial teórico

Em função da limitação de área dos painéis para simulação no PVsyst, de forma similar ao realizado por Strangueto (2016), foi modelado um arranjo de um sistema fotovoltaico de referência com área de 0,01 km² (1 ha – 10.000 m²) e adotada uma proporcionalidade com relação à área considerada como disponível do reservatório. Dessa forma, o potencial de instalação (MWp) e de geração de energia (GWh) para um reservatório são proporcionais ao número de arranjos de referência que cabem na área disponível do reservatório.

Também foi considerado que a área disponível do reservatório é 20% inferior à área do reservatório, em função dos seguintes fatores para instalação de SFFs: proximidades às tomadas d'água, vertedouros e sistemas ancilares, áreas de manobras de equipamentos, afastamento mínimo das margens, devido à presença de vegetação, sombreamentos, instalações diversas e a própria segurança dos painéis, assim como a necessidade de uma área de aeração do reservatório (Strangueto, 2016).

No presente trabalho, a estimativa do potencial teórico foi realizada para as seguintes áreas de ocupação:

- Área de ocupação máxima ($A_{m\acute{a}x}$): corresponde à área do reservatório na cota mínima de operação, com uma redução de 20%.
- Áreas de ocupação (A_1 e A_5): correspondem a percentuais de 1% e 5% da área na cota mínima de operação. Esses percentuais foram utilizados no levantamento do potencial do Banco Mundial (2018).

Para a estimativa do potencial, foram considerados todos os reservatórios relacionados na página do ONS. O número total de reservatórios avaliados foi de 152, distribuídos nos subsistemas e localizados nas bacias conforme indicados na Tab. 1.

Tabela 1 – Potência outorgada das usinas e número de reservatórios avaliados por subsistema e bacia.

Subsistema	Bacia	Número de UHEs		Potência outorgada (MW)	
		Fio d'água	Armazenamento	Fio d'água	Armazenamento
Sudeste/Centro-oeste	Amazonas	7	3	10.519	692
	Doce	7	1	1.128	112
	Grande	9	6	2.757	4.655
	Itabapoana	1	-	55	-
	Jequitinhonha	-	1	-	399
	Mucuri	1	-	60	-
	Paraguai	4	1	455	210
	Paraíba do Sul	8	5	1282	387
	Paraná	4	1	10.139	3.444
	Paranaíba	6	13	1.235	7.105
	Paranapanema	7	3	1.221	1.158
	São Francisco	-	3	-	585
	Rio Tietê	4	3	1.511	1.212
	Tocantins	3	2	1.596	1.774
TOTAL	61	42	31.958	21.732	
Sul	Capivari	-	1	-	260
	Iguaçu	4	4	2.801	4.476
	Itajaí	1	-	192	

Subsistema	Bacia	Número de UHEs		Potência outorgada (MW)	
		Fio d'água	Armazenamento	Fio d'água	Armazenamento
Sul	Jacuí	6	1	1.165	158
	Paranapanema	-	1	-	361
	Rio Uruguai	5	7	2.507	3.390
	TOTAL	16	14	6.665	8.645
Nordeste	Jequitinhonha	1	-	462	-
	Paraguaçu	-	1	-	160
	Parnaíba	-	1	-	237
	São Francisco	4	2	7.442	2.530
	TOTAL	5	4	7.904	2.927
Norte	Amazonas	3	2	11.626	293
	Araguari	3	-	549	-
	Tocantins	1	1	1.087	8.535
	TOTAL	7	3	13.262	8.828

2.3 Obtenção dos dados meteorológicos referentes à localização de cada reservatório

Para o levantamento da irradiância solar foram utilizados os dados de localização (latitude e longitude) do reservatório e, para a altitude, foi considerado o nível de água do reservatório na sua condição de cota máxima. Os valores foram obtidos por meio do programa Meteonorm o qual disponibiliza dados meteorológicos mensais e horários para qualquer localização geográfica do planeta. O Meteonorm foi desenvolvido pela Meteotest que é uma empresa suíça líder nas áreas de meteorologia, clima e meio ambiente.

A fonte de dados Meteonorm está disponível no PVsyst para os seguintes parâmetros: irradiância global e difusa no plano horizontal, velocidade do vento e temperatura ambiente. As fontes de dados incluídas neste programa se referem a medições em estações terrestres por todo o mundo e aplicação de modelos físicos de estimativa utilizando estações de satélite. Para a obtenção da irradiância global no plano do módulo fotovoltaico foi utilizado o modelo de transposição de Perez-Ineichen, que é o modelo padrão utilizado pelo PVsyst.

2.4 Modelagem de um arranjo de referência e simulações no PVsyst para cada reservatório

A Tab. 2 apresenta os principais parâmetros de entrada utilizados nas simulações com o PVsyst. O modelo do módulo fotovoltaico escolhido para as simulações foi um modelo comercial atual, de tecnologia de silício monocristalino, com 670 Wp. Por se tratar da estimativa de um potencial teórico, foi adotada uma inclinação dos painéis igual à latitude, a qual resulta em maior geração anual para instalações livres de sombreamento.

Tabela 2 – Principais parâmetros de entrada para simulação do arranjo de referência com o PVsyst.

Parâmetro de Simulação	Valor
Modelo do módulo FV	RSM-132-8-670-M [Risen Solar/670 Wp/Mono-Si] Eficiência: 21,6%
Quantidade de módulos / área (m ²)	2.790 / 8.667
Inclinação (°)	latitude local
Azimuth (°)	0
<i>Pitch</i> (m) ⁽¹⁾	1,5
Albedo ⁽²⁾	0,1
Rastreamento	Não
Potência nominal do arranjo de referência (kWp)	1.869
Perdas consideradas	sombreamento, LID, sujeira, cablagem, IAM, <i>mismatch</i> , e correção espectral
Ocupação máxima	80% da área na cota mínima
Percentuais de ocupação	1% e 5% da área na cota mínima

(1) Estudo realizado por Strangueto (2016) mostrou que as perdas por sombreamento com *pitch* de 2 m, não eram significativamente menores do que na configuração com 1,5 m para a maioria das inclinações de painéis. Para 1 m, as perdas por sombreamento foram consideradas elevadas.

(2) Albedo (Strangueto, 2016).

2.5 Estimativa do potencial teórico de cada reservatório e totais por subsistema, bacia hidrográfica, hidrelétricas a fio d'água e hidrelétricas com armazenamento

O potencial teórico de uma área de ocupação de um reservatório foi estimado a partir da potência elétrica ou energia do arranjo de referência, simulado na localidade do reservatório, e da relação entre a área de ocupação e a área do arranjo, de acordo com a fórmula apresentada na Eq. (1).

$$Pot = Pot_a \cdot \frac{A}{A_a} \quad (1)$$

Onde:

Pot : potência elétrica de pico (kWp) ou energia (GWh) da área de ocupação

Pot_a : potência elétrica de pico (kWp) ou energia (GWh) do arranjo de referência

A : área de ocupação (km²)

A_a : área do arranjo de referência (km²)

Os potenciais teóricos totais calculado por sistema, bacia hidrográfica, hidrelétricas a fio d'água e hidrelétricas com armazenamento correspondem à soma dos potenciais teóricos dos reservatórios de cada um desses grupos.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tab. 3 apresenta os 20 reservatórios com maior potencial teórico de instalação e de geração de energia para diferentes áreas de ocupação máxima, o que corresponde a 63,6% da área total dos reservatórios.

Tabela 3 – Potencial teórico de instalação e de geração de energia para os 20 reservatórios com maior potencial para as diferentes áreas de ocupação.

Usina	Tipo	Ocupação de 1% (A ₁)		Ocupação de 5% (A ₅)		Ocupação de 80% (A _{máx})	
		Potência (GWp)	Energia anual (TWh/ano)	Potência (GWp)	Energia anual (TWh/ano)	Potência (GWp)	Energia anual (TWh/ano)
P. Primavera	Fio d'água	3,59	5,69	17,94	28,47	286,97	455,56
Balbina	Armazenamento	3,00	4,44	14,98	22,21	239,72	355,29
Itaipu	Fio d'água	2,41	3,67	12,07	18,34	193,11	293,44
Sobradinho	Armazenamento	2,14	3,62	10,71	18,09	171,40	289,42
Tucuruí	Armazenamento	1,43	2,22	7,13	11,10	114,14	177,59
I. Solteira	Armazenamento	1,19	1,97	5,94	9,83	95,01	157,24
Lajeado	Fio d'água	1,17	1,86	5,87	9,31	93,85	148,88
Três Irmãos	Armazenamento	1,16	1,91	5,82	9,57	93,06	153,07
Itaparica	Armazenamento	1,14	1,85	5,72	9,24	91,60	147,76
Estreito Toc	Fio d'água	1,11	1,74	5,53	8,68	88,45	138,81
Furnas	Armazenamento	0,99	1,62	4,97	8,08	79,47	129,26
Sinop	Armazenamento	0,87	1,46	4,35	7,30	69,61	116,73
Promissão	Armazenamento	0,86	1,43	4,30	7,17	68,84	114,73
Serra Mesa	Armazenamento	0,85	1,42	4,26	7,11	68,11	113,80
São Simão	Armazenamento	0,76	1,28	3,82	6,42	61,12	102,78
A. Vermelha	Armazenamento	0,75	1,26	3,74	6,32	59,90	101,08
Três marias	Armazenamento	0,69	1,18	3,45	5,88	55,18	94,09
Belo monte	Fio d'água	0,68	1,04	3,42	5,21	54,69	83,42
Pimental	Fio d'água	0,68	1,04	3,42	5,22	54,69	83,57
Jupiá	Fio d'água	0,61	1,01	3,06	5,04	49,02	80,66

Onde:

A₁: Área de ocupação 1%, correspondente à 1% da área na cota mínima de operação.

A₅: Área de ocupação 5%, correspondente à 5% da área na cota mínima de operação.

A_{máx}: Área de ocupação máxima, igual à 80% da área da superfície do reservatório na cota mínima de operação.

Em função da sazonalidade da geração hídrica e fotovoltaica nas diferentes regiões, o resultado do potencial também é apresentado para os subsistemas controlados pelo ONS. A Tab. 4 apresenta o potencial teórico de instalação e de geração de energia anual estimado para diferentes áreas de ocupação distribuídos para cada subsistema e bacia.

Observa-se que o maior potencial se encontra no subsistema Sudeste/Centro-oeste, responsável por aproximadamente 66% da potência total estimada para todos os reservatórios e de 67% da energia anual estimada. A bacia hidrográfica com maior potencial é a bacia do Rio Paraná, com cerca de 19% do potencial total.

Tabela 4 – Potencial teórico de instalação e de geração de energia para cada subsistema e bacia para diferentes áreas de ocupação dos reservatórios.

Subsistema/Bacia	Ocupação de 1% (A ₁)		Ocupação de 5% (A ₅)		Ocupação de 80% (A _{máx})	
	Potência (MWp)	Energia Anual (GWh/ano)	Potência (MWp)	Energia Anual (GWh/ano)	Potência (MWp)	Energia Anual (GWh/ano)
Nordeste	4.599,9	7.510,4	22.999,6	37.552,1	367.993,5	600.833,3
Jequitinhonha	115,4	165,2	577,0	825,8	9.231,9	13.213,1
Paraguaçu	178,0	256,4	890,2	1.282,2	14.243,3	20.515,3
Parnaíba	507,5	794,7	2.537,3	3.973,6	40.596,3	63.576,9
São Francisco	3.799,0	6.294,1	18.995,1	31.470,5	303.922,1	503.528,1
Norte	7.159,5	10.884,6	35.797,3	54.423,2	572.756,6	870.771,4
Amazonas	4.490,1	6.731,2	22.450,6	33.655,9	359.209,6	538.494,3
Araguari	136,9	198,5	684,7	992,5	10.956,0	15.880,2
Tocantins	2.532,4	3.955,0	12.661,9	19.774,8	202.591,0	316.396,9
Sudeste/Centro-Oeste	27.098,1	44.166,6	135.490,7	220.832,8	2.167.851,8	3.533.324,8
Amazonas	2.611,2	4.366,9	13.056,2	21.834,4	208.898,6	349.350,9
Doce	111,2	160,6	555,9	803,0	8.895,1	12.848,7
Grande	3.266,7	5.412,1	16.333,5	27.060,4	261.335,8	432.966,7
Itabapoana	2,4	3,7	12,0	18,5	191,9	295,7
Jequitinhonha	112,4	172,8	562,1	863,8	8.994,3	13.821,1
Mucuri	14,2	20,4	71,2	102,2	1.139,4	1.635,0
Paraguai	547,5	906,9	2.737,6	4.534,3	43.802,0	72.548,4
Paraíba do Sul	343,1	502,6	1.715,7	2.513,0	27.451,8	40.207,4
Paraná	7.833,7	12.389,1	39.168,4	61.945,7	626.693,7	991.131,4
Paranaíba	3.141,1	5.300,9	15.705,5	26.504,3	251.288,7	424.069,4
Paranapanema	2.456,8	3.945,3	12.284,1	19.726,6	196.545,0	315.626,1
São Francisco	747,3	1.274,3	3.736,3	6.371,6	59.781,1	101.945,8
Tietê	2.989,2	4.930,1	14.946,1	24.650,3	239.137,8	394.405,4
Tocantins	2.921,2	4.780,9	14.606,0	23.904,6	233.696,6	382.472,8
Sul	2.194,8	3.302,8	10.974,2	16.514,2	175.587,6	264.226,8
Capivari	4,7	6,0	23,4	30,0	374,2	480,1
Iguaçu	920,9	1.405,4	4.604,7	7.027,0	73.675,3	112.432,7
Itajaí	0,2	0,3	1,2	1,7	19,8	26,6
Jacuí	175,0	248,6	875,0	1.243,2	14.000,0	19.891,4
Paranapanema	122,4	195,9	611,9	979,6	9.791,1	15.674,2
Uruguai	971,6	1.446,5	4.858,0	7.232,6	77.727,2	115.721,8

Considerando a grande inserção de fontes intermitentes, alguns estudos (Silvério, 2018) indicam a possibilidade de operação coordenada de SFFs com UHEs, visando um melhor aproveitamento da energia hídrica armazenada e redução dos efeitos negativos da geração intermitente da fotovoltaica. Por este motivo são apresentados separadamente os resultados das usinas a fio d'água e com armazenamento, uma vez que nas usinas com armazenamento a operação coordenada é mais simples, embora ainda não haja regulação para este tipo de operação.

A Tab. 5 apresenta o potencial teórico total de instalação e de geração de energia anual considerando as usinas com reservatórios a fio d'água, com armazenamento e todos os reservatórios para as diferentes áreas de ocupação dos SFFs. O potencial estimado de geração de energia referente à ocupação máxima (80%) é de 2.164 TWh/ano e 3.105,1 TWh/ano para usinas a fio d'água e com armazenamento respectivamente. Para uma ocupação de 5% o

potencial total de instalação é de aproximadamente 205 GWp e de geração é de 329 TWh/ano. Observa-se que com apenas 5% de ocupação o percentual de instalação já é superior ao total da potência fiscalizada no Brasil em setembro de 2023, de aproximadamente 196 GW (Aneel, 2023), abrangendo tanto o Sistema Interligado Nacional (SIN), quanto os Sistemas Isolados (SISOL).

Tabela 5 – Potencial teórico de instalação e de geração de energia para reservatórios a fio d'água e para reservatórios com armazenamento para diferentes áreas de ocupação.

Potencial Teórico para todos os reservatórios das UHEs						
Percentual de ocupação (cota mínima)	UHEs a fio d'água		UHEs com armazenamento		Total	
	Potência (GWp)	Energia (TWh/ano)	Potência (GWp)	Energia (TWh/ano)	Potência (GWp)	Energia (TWh/ano)
1%	17,1	27,1	24,0	38,8	41,1	65,9
5%	85,3	135,3	119,9	194,1	205,2	329,4
80%	1.365,3	2.164,0	1.918,9	3.105,1	3.284,2	5.269,1

4. CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou uma estimativa do potencial teórico de instalação e geração de energia por sistemas fotovoltaicos flutuantes em reservatórios de usinas hidrelétricas no Brasil, com base em simulações com o software PVsyst. Considerando a ocupação de 80% da área de todos os reservatórios em sua cota mínima de operação, a estimativa do potencial de instalação e de geração de energia anual foi de 3.284,2 GWp e de 5.269,1 TWh/ano, respectivamente, sendo que, deste potencial, cerca de 58% são para usinas com armazenamento. Observa-se que com apenas 5% de ocupação o percentual de instalação já é superior ao total da potência instalada no Brasil.

Na estimativa realizada neste trabalho não foram incluídas possíveis restrições físicas, socioambientais, de operação e regulatórias para implantação dos SFFs. Dado o potencial teórico promissor estimado é importante realizar estudos adicionais incluindo tais restrições e a operação coordenada de SFFs com UHEs, a fim de subsidiar a elaboração de regulamentação específica.

REFERÊNCIAS

- ANEEL-Agência Nacional de Energia Elétrica, 2017. Banco de informações de geração (BIG), Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>. Acesso em: 16 de maio de 2018.
- ANEEL-Agência Nacional de Energia Elétrica, 2023, Disponível em: <https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/noticias/2023/expansao-da-matriz-eletrica-brasileira-ultrapassa-os-7-gw-em-2023>. Acesso em: 25 de outubro de 2023
- CCEE-Câmara de Comercialização de Energia Elétrica, 2023. Acervo CCEE. Disponível em: <https://www.ccee.org.br/web/guest/acervo-ccee>. Acesso em: 25 de outubro de 2023.
- Cepel-Centro de Pesquisas de Energia Elétrica, 2023. Planejamento da Operação de Longo/Médio Prazos - Programa NEWAVE. Disponível em: <https://www.cepel.br/linhas-de-pesquisa/newave/>.
- EPE-Empresa de Pesquisa Energética, 2016. O compromisso do Brasil no combate às mudanças climáticas: Produção e Uso da Energia, Rio de Janeiro. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/>. Acesso em: 25 de outubro de 2023.
- EPE-Empresa de Pesquisa Energética, 2020. Solar Fotovoltaica Flutuante - Aspectos Tecnológicos e Ambientais relevantes ao Planejamento. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/>. Acesso em: 25 de outubro de 2023.
- IEA, 2022. Trends in Photovoltaic Applications 2022, PVPS, p. 22. Disponível em: https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2023/02/PVPS_Trend_Report_2022.pdf.
- Jin, Y., *et al.*, 2023. Energy Production and Water Savings from FloatingSolar Photovoltaics on Global Reservoirs, PV Magazine, Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/369201558_Energy_production_and_water_savings_from_floating_solar_photovoltaics_on_global_reservoirs.
- Lee, N., *et al.*, 2020. Hybrid floating solar photovoltaics-hydropower systems: Benefits and global assessment of technical potential, Renewable Energy, vol. 162, pp. 1415–1427. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.08.080>.
- Lopes, M. P. C., 2020. Usinas fotovoltaicas flutuantes como alternativa para a geração de energia e redução da evaporação em açudes do semiárido brasileiro, Tese de Doutorado, Programa de Pós-graduação em Planejamento Energético (PPE), COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Rio de Janeiro.

- López, M., Soto, F., Hernández, Z. A., 2022, Assessment of the potential of floating solar photovoltaic panels in bodies of water in mainland Spain, *J. Clean. Prod.*, vol. 340, doi: 10.1016/j.jclepro.2022.130752.
- Neves, C. E. T.; Silva, J. C.; Urbanetz Jr., J.; Possetti, G. R. C.; Novak, L. H., 2018. Análise do potencial de geração de energia elétrica com a implantação de usinas fotovoltaicas flutuantes em reservatórios de água no estado do Paraná, XICBPE, Congresso Brasileiro de Planejamento Energético, Cuiabá.
- ONS-Operador Nacional do Sistema Elétrico, 2023. Portal de Dados Abertos do ONS. Reservatórios. Disponível em: <https://dados.ons.org.br/dataset/reservatorio>.
- PVsyst AS, 2023, PVsyst: Photovoltaic Software, Versão 7.4, Satigny, Disponível em: www.pvsyst.com.
- REN21, 2023. Renewables 2023: Global Status Report, REN21, Paris. Disponível em: https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/GSR2022_Full_Report.pdf.
- Silvério, N. M., 2018, Utilização de usinas solares flutuantes para operação coordenada com centrais hidrelétricas: estudo de caso das hidrelétricas da bacia do rio São Francisco, Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá. Disponível em: <https://repositorio.unifei.edu.br/jspui/handle/123456789/1155>.
- Strangueto, K. M., 2016. Estimativa do potencial brasileiro de produção de energia elétrica através de sistemas fotovoltaicos flutuantes em reservatórios de hidroelétricas, Tese de doutorado, Unicamp, Campinas. Disponível em: <http://repositorio.unicamp.br/Acervo/Detalle/968003>.
- World Bank, 2018. Where Sun Meets Water: Floating Solar Market Report - Executive Summary, World Bank Group, ESMAP SERIS, Washington, D.C.. Disponível em: <http://documents.worldbank.org/curated/en/579941540407455831/Floating-Solar-Market-Report-Executive-Summary>.
- Xia, Z., Li, Y., Guo S., Chen, R., Zhang, W., Zhang, P., Du, P., 2023. Mapping global water-surface photovoltaics with satellite images, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 187, 113760, ISSN 1364-0321. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113760> (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032123006172>).

ESTIMATION OF THEORETICAL POTENTIAL FOR ELECTRIC POWER GENERATION BY FLOATING PHOTOVOLTAIC SYSTEMS (SFF) IN HYDROELECTRIC RESERVOIRS IN BRAZIL

Abstract. *This document presents an estimate of the potential for installation and energy generation of floating photovoltaic systems (FPVs) in hydroelectric plant reservoirs in Brazil. Based on simulations of the photovoltaic systems carried out in the PVsyst software, estimation was performed for different floating system area occupation, 1%, 5% and 80% of the surface of the reservoirs at their minimum operating level. The potentials were evaluated for each subsystem of the National Interconnected System (SIN), for each river basin and by type of plant, run-of-river or with storage. The estimate of the total installation and energy generation potential for all reservoirs was 3,284.2 GWp and 5,269.2 TWh/year, respectively. The subsystem with the greatest potential was the Southeast/Midwest subsystem, responsible for around 66% of the total. The potential in hydroelectric plants with storage is approximately 58% of the total potential. The estimates did not include possible physical, socio-environmental, operational, and regulatory restrictions for the implementation of FPVs.*

Keywords: *Floating Photovoltaic Systems, Theoretical Potential*