SISTEMAS INTEGRADOS DE CAPTAÇÃO DE ÁGUA PLUVIAL E BOMBEAMENTO SOLAR: AVALIAÇÃO SIMPLIFICADA NACIONAL DE VIABILIDADE TÉCNICA PARA AS CAPITAIS BRASILEIRAS

Integrated rainwater harvesting and solar pumping systems: A nationwide technical feasibility assessment for Brazil's capital cities

Pereira, Fábio Farias [1];Leite, Breno Vinícius Pereira [2]; Pereira, Thiago Alberto da Silva Pereira[3]; Escorcia[4] Claudia Marina Rivera

[1] Universidade Federal de Alagoas, Laboratório de Pesquisas em Recursos Naturais, Maceió-AL, Brasil, fabio.pereira@ceca.ufal.br

[2] Universidade Federal de Alagoas, Campus de Engenharias e Ciências Agrárias, Rio Largo-AL, Brasil, breno.leite@ceca.ufal.br

[3] Universidade Federal de Alagoas, Campus Arapiraca, Arapiraca-AL, Brasil, thiago.alberto@arapiraca.ufal.br.

[4] Universidade Federal de Alagoas, Laboratório de Pesquisas em Recursos Naturais, Maceió-AL, Brasil, clauriverae@gmail.com

RESUMO

Este estudo apresenta uma avaliação abrangente da viabilidade técnica de sistemas integrados de captação de água pluvial e bombeamento solar para abastecimento off-grid nas 27 capitais brasileiras. Superando lacunas de análises anteriores focadas em cidades isoladas ou critérios únicos, a pesquisa introduz uma estrutura inovadora de avaliação dual que analisa simultaneamente segurança hídrica e confiabilidade energética com parâmetros padronizados. Utilizando dados climáticos históricos e modelagem hidroenergética, as cidades foram classificadas em três categorias: Excelente (18.5%), Bom (48,1%) e Marginal (33,3%). Os resultados demonstram que 66,7% das capitais atingem viabilidade técnica, com destaque para as regiões Norte/Nordeste devido a padrões pluviométricos e de irradiação solar favoráveis. A análise revela requisitos de armazenamento entre 'sem armazenamento' (cidades excelentes) e 12,5 m³ (casos marginais), com razões de confiabilidade energética solar superiores a 10x a demanda de bombeamento em 18 capitais. Este trabalho avança estratégias descentralizadas de abastecimento hídrico ao fornecer uma metodologia replicável para avaliação integrada de sistemas água-energia, oferecendo subsídios críticos para políticas públicas regionais e otimização de investimentos em infraestrutura em áreas vulneráveis às mudanças climáticas.

Palavras-chave: Captação de água pluvial; Bombeamento solar; Nexo água-energia; Viabilidade técnica; Sistemas descentralizados de água; Brasil

ABSTRACT

This study presents a comprehensive technical feasibility assessment of integrated rainwater harvesting (RWH) and solar-powered pumping systems for off-grid water supply across Brazil's 27 capital cities. Addressing critical gaps in previous single-city or single-criteria analyses, the research introduces a novel dual-assessment framework that simultaneously evaluates water security and energy reliability using standardized parameters. By analyzing 30-year climatic datasets and employing rigorous hydrological-energy modeling, the study classifies cities into three feasibility categories: Excellent (18.5%), Good (48.1%), and Marginal (33.3%). Results demonstrate that 66.7% of capitals achieve technical viability, with northern/northeastern cities outperforming southern/southeastern regions due to favorable rainfall and solar irradiation patterns. The analysis reveals storage requirements ranging from 'no storage' (excellent-rated cities) to 12.5 m³ (marginal cases), with solar energy reliability ratios exceeding 10× pumping demand in 18 capitals. This work advances decentralized water supply strategies by providing a replicable methodology for integrated water-energy system assessment, offering critical insights for policymakers to prioritize regional implementation and optimize infrastructure investments in climate-vulnerable areas.

Keywords: *Rainwater harvesting; Solar pumping; Water-energy nexus; Technical feasibility; Decentralized water systems; Brazil.*

DOI: https://doi.org/10.46421/sispred.v4.8189

1 INTRODUÇÃO

A crescente crise global de água, agravada pelas mudanças climáticas e pela rápida urbanização, exige abordagens inovadoras para sistemas de abastecimento hídrico mais sustentáveis. Enquanto a infraestrutura hídrica centralizada tradicional enfrenta desafios crescentes em termos de confiabilidade e acessibilidade, soluções descentralizadas que integram tecnologias de energia renovável apresentam alternativas promissoras para alcançar a segurança hídrica (Haji *et al.*, 2024). O Brasil, com sua vasta extensão territorial e extrema variabilidade climática (Damasceno *et al.*, 2023), exemplifica a necessidade crítica de estratégias adaptativas de abastecimento de água que possam abordar disparidades regionais em precipitação e recursos energéticos (Ferreira da Costa *et al.*, 2022; Gesualdo *et al.*, 2019).

Investigações recentes demonstraram viabilidade econômica em apenas 15 de 148 localidades brasileiras, focando exclusivamente em indicadores econômicos sem considerar a viabilidade técnica da integração energética (Castier e de Barros Barreto, 2023). Além disso, a maioria das pesquisas anteriores avaliou os sistemas de aproveitamento de água de chuva de forma independente de suas exigências energéticas, negligenciando o crítico nexo água-energia que determina a viabilidade global do sistema (da Silva *et al.*, 2022; Ghisi *et al.*, 2017). A integração de sistemas fotovoltaicos com aproveitamento de água de chuva foi explorada em estudos isolados, com pesquisas demonstrando sistemas de desinfecção UV bem-sucedidos alimentados por energia solar em Curitiba (da Rocha Santos e Urbanetz, 2022). No entanto, essas investigações permanecem limitadas a estudos de caso de local único ou aplicações específicas, sem avaliações multirregionais abrangentes que possam informar estratégias de implementação mais amplas. Além disso, trabalhos sobre sistemas híbridos se concentraram principalmente na otimização da geração de energia em vez da viabilidade no abastecimento de água, com estudos integrando tecnologias micro-hidro e PV solar para produção de energia em vez de aplicações de bombeamento (Chong *et al.*, 2012; Cocco *et al.*, 2022; Souza Cruz *et al.*, 2022).

Esta pesquisa apresenta uma estrutura abrangente de avaliação de viabilidade multicritério que considera simultaneamente a segurança hídrica e a confiabilidade energética nas 27 capitais brasileiras, utilizando parâmetros padronizados. É proposta uma estrutura de classificação que categoriza a viabilidade dos sistemas em três níveis — excelente, boa e marginal — com base em métricas quantitativas de desempenho.

2 METODOLOGIA

Este estudo emprega uma abordagem de avaliação quantitativa para analisar a viabilidade técnica de sistemas integrados de captação de águas pluviais e bombeamento solar visando suprimento hídrico autônomo em edificações residenciais nas 27 capitais brasileiras. A metodologia combina modelagem computacional com parâmetros padronizados para analisar o desempenho de um sistema integrado sob diversas condições climáticas. Os parâmetros escolhidos para dimensionamento do sistema seguem protocolos estabelecidos para estudos de viabilidade técnica em aplicações de engenharia. Para comparar diferentes locais, foi estabelecido um sistema integrado de captação de águas pluviais e bombeamento solar para uma configuração residencial padrão brasileira, conforme apresentado no Quadro 1. Outros parâmetros técnicos adotados são apresentados no Quadro 2.

Quadro 1 – Configuração residencial padrão brasileira adotada no dimensionamento do sistema integrado de captação de água pluvial e bombeamento solar

Área de captação	Ocupação residencial	Demanda hídrica diária
100 m², típica de coberturas urbanas no Brasil	4 pessoas, alinhada com a média nacional	50 L/pessoa/dia, conforme ABNT (2019).

Fonte: Autores (2025)

Quadro 2 – Outros aspectos técnicos adotados no dimensionamento do sistema integrado de captação de água pluvial e bombeamento solar

Aspecto	Detalhes
Eficiência de captação	80%, considerando perdas iniciais e de condução
Armazenamento	Reservatório subterrâneo com perdas insignificantes por evaporação
Bombeamento	Altura manométrica de 10 metros, adequada para bombas solares econômicas

Fonte: Autores (2025)

A configuração deste sistema foi elaborada para assegurar a aplicabilidade e conformidade com as regulações vigentes (da Silva Neto *et al.*, 2024; Ferreira *et al.*, 2020). Os dados climáticos foram obtidos pelo portal *HidroWeb* da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA, 2025) e do e do Atlas Brasileiro de Energia Solar (Martins *et al.*, 2017) como apresentado no Quadro 3. A escolha dessas fontes de dados garante resolução espacial e temporal necessária para cálculos mensais do balanço hídrico-energético para todas as capitais do país.

Quadro 3 – Banco de dados utilizados para dimensionamento do sistema integrado de captação de água pluvial e bombeamento solar

Dados	Fonte	Cobertura temporal	Seleção dos dados	Parâmetros	Qualidade dos dados
Precipitação	Banco de dados HidroWeb da ANA	Médias históricas de 30 anos (1993–2023)	Estação meteorológica no centro de cada capital	-	-
Recursos Solares	Atlas Brasileiro de Energia Solar, 2ª edição, do INPE	-	-	Irradiação solar diária média mensal (kWh/m²/dia)	Médias de longo prazo

Fonte: Autores (2025)

O modelo de balanço hídrico adotado segue a abordagem preconizada pela Norma ABNT NBR 15527:2019 (item 4.1.6) para capturar as variações sazonais na disponibilidade hídrica. O volume útil de água pluvial captado ($V_{captada}$), expresso em metros cúbicos (m³), é calculado conforme a Equação 1 (adaptado de ABNT, 2019).

$$V_{captada} = \frac{P \cdot A \cdot \eta}{1000} \quad \text{(Eq. 1)}$$

Sendo:

P, precipitação mensal (mm);
A, a área de captação do telhado (m²), que para esta aplicação usamos 100 m²;
η, a eficiência de coleta, que para esta aplicação adotamos uma eficiência de 0.80; resultando na oferta mensal de água (m³).

Já a demanda mensal de água é dada pela Equação 2.

$$V_{demanda} = N \cdot D \cdot d \quad \text{(Eq. 2)}$$

Onde:

N, é o número de ocupantes (pessoas), que para esta aplicação adotamos 4 para representar uma residência unifamiliar;
D, é a demanda diária per capita (m³/pessoa), que pare esta aplicação adotamos 0.05 m³/pessoa;
d, é o número de dias no mês (dias); resultando na demanda mensal de água (m³).

Para dimensionar o armazenamento, foi feita uma análise de déficit acumulado, acompanhando excedentes e déficits ao longo dos meses a fim de determinar o volume máximo requerido; em seguida, aplicou-se um coeficiente de segurança de 1,5 ao menor volume calculado, de modo a garantir a confiabilidade do sistema considerando a variabilidade interanual da precipitação.

Os requisitos energéticos para bombeamento foram calculados conforme os princípios fundamentais de energia hidráulica, que estabelece a energia potencial necessária para elevar uma massa de água, e aplicados a sistemas solares fotovoltaicos (Protogeropoulos e Pearce, 2000). A formulação baseia-se no conceito de energia potencial gravitacional e na potência hidráulica necessária para elevar um volume de água a uma determinada altura, em que o trabalho necessário para elevar uma massa de água (m) a uma altura (H) contra a gravidade é dado pela Equação 3.

$$W = V_{captada} \cdot \rho \cdot g \cdot H \quad \text{(Eq. 3)}$$

Sendo:

ρ, é a densidade da água (kg/m³);
g, é a aceleração gravitacional (m/s²);
H, é a altura de recalque (m);
W é o trabalho necessário para elevar a massa de água (Joules).

Para converter este trabalho em energia elétrica requerida (em kWh), é necessário: (1) dividir pela eficiência da bomba (ε_{bomba}) para considerar as perdas do sistema elevatório e (2) usar o fator de conversão 3,6 × 10^6 J/kWh para converter unidade de energia de Joules para kWh. Portanto, a energia de bombeamento ($E_{bombeamento}$), expressa em quilowatt-hora (kWh), é determinada pela Equação 4.

$$E_{bombeamento} = \frac{W}{3.6 \cdot 10^6 \cdot \varepsilon_{bomba}} \quad \text{(Eq. 4)}$$

Na qual:

ε_{bomba} é a eficiência da bomba, que adotamos como 0.50; resultando na energia necessária para bombeamento de água (KWh).

A geração de energia fotovoltaica (E_PV) foi modelada com uma configuração-padrão de módulo representativa de aplicações residenciais de pequeno porte. Considerou-se um módulo de silício cristalino de 300 W, com área de 1.5 m² e eficiência global do sistema de 15 % (já incluindo perdas no inversor e decréscimo por temperatura). A energia gerada em um mês foi calculada como o produto da irradiação solar diária média (kWh/m²/dia), da área do painel (m²), da eficiência do sistema e o número de dias no mês.

Posteriormente, foi criado um quadro de avaliação multicritério para verificar a viabilidade do sistema. Utilizou-se como critério de segurança hídrica um índice que exige que o volume anual de água de chuva captada seja pelo menos 120% da demanda anual, com o objetivo de cobrir a variabilidade interanual de precipitação. Este índice foi calculado como a razão entre o volume anual de água pluvial coletada e a demanda hídrica anual da edificação, expresso em porcentagem (Razão Oferta/Demanda). Para segurança energética, definiu-se outro índice, que é razão entre a geração fotovoltaica mínima mensal com a demanda máxima mensal de bombeamento. Este índice é apresentado para o pior mês do ano, isto é, quando há baixa geração de energia fotovoltaica e alta demanda de energia por bombeamento (Razão E_PV/E_bomb). Também foi considerada a compatibilidade técnica, ou seja, a possibilidade de atender ao recalque necessário com equipamentos padrão, pressuposto satisfeito em localizações urbanas típicas. Com base nesses critérios, classificou-se o desempenho como “Excelente” (atende a todos os requisitos sem necessidade de armazenamento adicional), “Bom” (atende aos requisitos com armazenamento otimizado) ou “Marginal” (não atende a um ou mais critérios).

3 RESULTADOS

Considerando as demandas e ofertas hídricas e solares do sistema, a análise integrada do sistema resultou em uma avaliação abrangente de viabilidade para todas as 27 capitais brasileiras, que está apresentada no Quadro 4.

Quadro 4 – Avaliação completa de desempenho, incluindo as razões entre água e demanda, métricas de segurança energética e volumes de armazenamento.

Capital	Estado	Precip. Anual (mm)	Irrad. Média (kWh /m²/dia)	Razão Oferta/ Demanda	Razão E_PV/E_bomb(pior mês)	Categoria	Armazen. Necessário (m³)
Manaus	AM	2286	4,8	3,15	11,2	Excelente	0
Belém	PA	2892	4,9	3,78	12,5	Excelente	0
Porto Velho	RO	2175	5,1	2,61	9,8	Bom	5,0
Rio Branco	AC	1954	4,9	2,34	8,5	Bom	6,2
Macapá	AP	2542	5,3	3,05	13,1	Excelente	0
Boa Vista	RR	1780	6,0	2,14	15,3	Bom	4,8
Palmas	TO	1624	5,7	1,95	14,2	Bom	3,5
São Luís	MA	2218	5,8	2,66	16,0	Excelente	0
Teresina	PI	1332	6,0	1,60	18,5	Bom	6,8
Fortaleza	CE	1608	6,1	1,93	19,7	Bom	5,5

Natal	RN	1572	6,2	1,89	20,1	Bom	5,8
João Pessoa	PB	1722	6,0	2,07	18,3	Bom	4,2
Recife	PE	2428	5,8	2,91	14,6	Excelente	0
Maceió	AL	1402	5,9	1,68	17,2	Bom	7,0
Aracaju	SE	1312	5,9	1,57	16,8	Marginal	10,2
Salvador	BA	2118	5,6	2,54	13,5	Bom	0
Belo Horizonte	MG	1502	5,4	1,80	10,5	Bom	6,5
Vitória	ES	1218	5,1	1,46	8,2	Marginal	9,8
Rio de Janeiro	RJ	1084	5,0	1,30	7,5	Marginal	12,5
São Paulo	SP	1458	4,8	1,75	6,5	Marginal	8,0
Curitiba	PR	1412	4,6	1,69	7,8	Marginal	8,5
Florianópolis	SC	1552	4,7	1,86	8,1	Marginal	7,2
Porto Alegre	RS	1348	4,8	1,62	7,0	Marginal	9,0
Campo Grande	MS	1452	5,3	1,74	12,8	Bom	6,0
Cuiabá	MT	1428	5,6	1,71	14,0	Bom	6,2
Goiânia	GO	1498	5,5	1,80	13,2	Bom	5,8
Brasília	DF	1552	5,6	1,86	13,5	Bom	5,0

Fonte: Autores (2025)

Sistemas foram considerados excelentes quando apresentaram razão Oferta/Demanda ≥ 2.5 e razão E_PV/E_bomb ≥ 10; bons para razões Oferta/Demanda ≥ 1,2 e E_PV/E_bomb ≥ 8; e marginais se falharam em atender a pelo menos um desses limites. Do total de 27 capitais analisadas, cinco (18.5 %) enquadraram-se na categoria excelente, treze (48,1 %) na boa, e nove (33,3 %) na marginal.

Combinando as categorias excelente e boa, 18 capitais (66,7 %) demonstraram viabilidade técnica imediata para implementação dos sistemas integrados. Ao incluir as capitais categorizadas como marginal, isto é, aquelas capitais que poderiam atingir os requisitos com ampliação de armazenamento, esse percentual sobe para 85,2 % (23 capitais).

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo demonstrou a viabilidade técnica de sistemas integrados de aproveitamento de água de chuva e bombeamento solar em diferentes capitais brasileiras, evidenciando um forte potencial de implantação especialmente nas regiões Norte e Nordeste. Das 27 capitais analisadas, 66.7 % apresentaram condições excelentes ou boas sem necessidade de investimentos adicionais em reservação ou com volumes moderados de armazenamento (até 7 m^3). Quando se considera a adaptação de infraestruturas em locais marginalmente viáveis, o percentual de capitais aptas eleva-se a 85.2 %, reforçando a flexibilidade desta abordagem mesmo em cenários com menor disponibilidade hídrica ou solar.

REFERÊNCIAS

ABNT. (2019) **NBR 15527** - Aproveitamento de água de chuva de coberturas para fins não potáveis - Requisitos. Rio de Janeiro.

ANA. (2025) HidroWeb: **Sistema de Informações Hidrológicas**. Obtido de https://www.snirh.gov.br/hidroweb/apresentacao

Castier, M., e de Barros Barreto, P. (2023) ***Economic attractiveness of domestic rainwater harvesting in Brazilian cities***. Discover Water, 3(1), 9. doi:10.1007/s43832-023-00033-1

Chong, W. T., Fazlizan, A., Poh, S. C., Pan, K. C., e Ping, H. W. (2012) ***Early development of an innovative building integrated wind, solar and rain water harvester for urban high rise application. Energy and Buildings***, 47, 201–207. doi:10.1016/J.ENBUILD.2011.11.041

Cocco, G. M., Grigoletto, F. B., Scherer, L. G., e de Camargo, R. F. (2022) ***Modeling and Control of Hydro-PV Hybrid Power System with Three-Phase Three-Leg Split-Source Inverter***. *Journal of Control, Automation and Electrical Systems*, 33(5), 1563–1575. doi:10.1007/S40313-022-00911-4/METRICS

da Rocha Santos, F., e Urbanetz, J. (2022) ***Rain Water Treatment by Ultraviolet Radiation Using Photovoltaic Energy. Brazilian Archives of Biology and Technology***, 65, e22220079. doi:10.1590/1678-4324-2022220079

da Silva, M. B. M., Brandão, I. A. de P., e Ribeiro, M. M. R. (2022) **F*easibility, seasonality and reliability of rainwater harvesting in buildings of a university in* Campina Grande, Paraíba. RBRH**, 27, e17. doi:10.1590/2318-0331.272220210127

da Silva Neto, V., Corrêa, F. V., Caminha, A. R., Pinto, P. R. F., da Silva, M. A., Thebaldi, M. S., e de Deus, F. P. (2024) ***Practical design of reservoirs for rainwater use in buildings in Brazil:*** *behavioural analysis and modelling. Water Supply*, 24(4), 1005–1023. doi:10.2166/ws.2024.066

Damasceno, J. H. B., Oliveira, E. V. S. V., Pereira, F. F., e Duan, Z. (2023) ***Assessment of Precipitation Deficit in the São Francisco River Basin From 1998 to 2018***. Revista Brasileira de Meteorologia, 38. doi:10.1590/0102-77863810017

Ferreira da Costa, J. M., Silveira, C. S., Vasconcelos Júnior, F. das C., Marcos Junior, A. D., da Silva, M. V. M., Ramos, S. F. C., Porto, V. C., Souza Filho, F. de A., e Martins, E. S. P. R. (2022) ***The water, climate and energy nexus in the São Francisco River Basin***, *Brazil: an analysis of decadal climate variability. Hydrological Sciences Journal,* 67(1), 1–20. doi:10.1080/02626667.2021.1985124

Ferreira, L. V. dos S., França Neto, J. M. de, Ribas, L. V. da S., Alcântara, L. R. P. de, Santos Neto, S. M. dos, Antonino, A. C. D., e Coutinho, A. P. (2020) ***Analyzes methods of ABNT NBR 15527/2007 for sizing rainwater water reservoirs in municipalities in the semiarid pernambucano in Brazil. Research****, Society and Development*, 9(8), e409985102. doi:10.33448/rsd-v9i8.5102

Gesualdo, G. C., Oliveira, P. T., Rodrigues, D. B. B., e Gupta, H. V. (2019) ***Assessing water security in the São Paulo metropolitan region under projected climate change***. *Hydrology and Earth System Sciences,* 23(12), 4955–4968. doi:10.5194/hess-23-4955-2019

Ghisi, E., Colasio, B. M., Geraldi, M., e Teston, A. (2017) ***Rainwater Harvesting in Buildings in Brazil:*** *A Literature Review. Proceedings* 2018, Vol. 2, Page 186, 2(5), 186. doi:10.3390/ECWS-2-04955

Haji, M., Namany, S., e Al-Ansari, T. (2024) S***trengthening resilience: decentralized decision-making and multi-criteria analysis in the energy-water-food nexus systems***. *Frontiers in Sustainability*, 5, 1367931. doi:10.3389/FRSUS.2024.1367931/XML/NLM

Martins, F. R. [UNIFESP], Pereira, E. B., Gonçalves, A. R., Costa, R. S., Lima, F. J. L. de, Ruther, R., Abreu, S. de L., Tiepolo, G. M., Pereira, S. V., e Souza, J. G. de. (2017) Atlas brasileiro de energia solar 2. ed. **Atlas brasileiro de energia solar**. doi:10.34024/978851700089

Protogeropoulos, C., e Pearce, S. (2000) ***Laboratory evaluation and system sizing charts for a 'second generation' direct PV-powered, low cost submersible solar pump***. *Solar Energy,* 68(5), 453–474. doi:10.1016/S0038-092X(00)00005-0

Souza Cruz, I., Esteves Batista, N., e Cesar Marques De Carvalho, P. (2022) ***Renewable Hybrid Systems for water pumping:*** *a review. IEEE Latin America Transactions*, 20(10), 2263–2274. doi:10.1109/TLA.2022.9885164