

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

RÔMULO CÉSAR PEREIRA

ESTUDO PARA IMPLANTAÇÃO DE UMA USINA SOLAR FOTOVOLTAICA NO
MODELO HÍBRIDO COM UMA USINA HIDRELÉTRICA JÁ EXISTENTE

CURITIBA

2023

RÔMULO CÉSAR PEREIRA

ESTUDO PARA IMPLANTAÇÃO DE UMA USINA SOLAR FOTOVOLTAICA NO
MODELO HÍBRIDO COM UMA USINA HIDRELÉTRICA JÁ EXISTENTE

Artigo apresentado à disciplina Trabalho Final do Curso como requisito parcial à conclusão do Curso de MBA em Gestão Estratégica em Energias Naturais Renováveis, Setor de Educação Continuada em Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná.

Orientador(a): Prof.(a) Lucieli Rossi

CURITIBA

2023

Estudo para implantação de uma usina solar fotovoltaica no modelo híbrido com uma usina hidrelétrica já existente

Rômulo César Pereira

RESUMO

Este artigo tem como objetivo apresentar um estudo de caso para implantação de uma usina solar fotovoltaica no modelo híbrido com uma usina hidrelétrica, através da utilização da infraestrutura de subestações, linhas de transmissão e local já existentes. Devido a sazonalidade da energia gerada na usina hidrelétrica objeto de estudo, poder-se-ia aproveitar o período de baixas vazões para geração de energia solar fotovoltaica, aproveitando desta forma os melhores períodos de insolação para injeção de potência no sistema elétrico. Através do projeto proposto, buscar-se-á utilizar de forma mais eficiente os recursos de transmissão já existentes, otimizando custos de operação e manutenção, bem como garantindo maior segurança no fornecimento de energia ao sistema elétrico.

Palavras-chave: hidráulica, solar, sistemas híbridos, fotovoltaica, complementaridade

ABSTRACT

This article aims to present a case study to implementation of a photovoltaic solar plant in the hybrid model with an existing hydroelectric plant, using the infrastructure of substations and transmission lines already installed. Due to the seasonality of the energy generated in the hydroelectric power plant under study, this system could use the period of low river flows to generate photovoltaic solar energy, taking advantage of the best periods of sunlight to inject power into the electrical system. Through the proposed project, an attempt will be made to make efficient use of existing transmission resources, optimizing operation and maintenance costs, as well as ensuring greater security in the supply of energy to the electrical system.

Keywords: hydraulics, solar, hybrid systems, photovoltaics, complementarity

1 INTRODUÇÃO

A geração híbrida de energia é conceituada na literatura como aquela em que as fontes se combinam ainda no processo de produção de energia elétrica, não sendo possível sequer distinguir qual fonte primária foi responsável por qual parte da geração de energia elétrica (EPE,2018). Já de acordo com a Resolução Normativa (REN) 954/2021 da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), uma Central Geradora Híbrida (UGH) consiste em uma instalação de produção de energia elétrica a partir da combinação de diferentes tecnologias de geração, com medições distintas por tecnologias de geração ou não, objeto de outorga única. Neste tipo de projeto, ocorre a combinação de fontes de energia tendo como premissa fornecer uma solução mais eficiente e confiável. Neste contexto, uma das combinações mais comuns é a geração híbrida de energia hidráulica e solar. A hidroeletricidade é uma fonte de energia limpa e renovável que tem sido amplamente utilizada em todo o mundo. No entanto, sua geração pode ser afetada por mudanças climáticas e flutuações na disponibilidade de água. Como alternativa para compensar as flutuações de geração de energia devido ao regime hidrológico variável, tem-se a possibilidade de adição de geração solar ao empreendimento, o que ajuda a compensar essas flutuações e a fornecer uma fonte de energia constante nesses períodos.

Isso posto, tem-se que através da utilização de geração híbrida de energia hidráulica e solar seja possível que as usinas hidrelétricas aproveitem ao máximo sua capacidade durante períodos hidrológicos favoráveis, enquanto a geração solar pode complementar a produção durante períodos de escassez de água. Isso leva a uma produção de energia mais eficiente e a um uso mais eficaz da infraestrutura e do local de instalação do empreendimento de geração hidráulica.

Neste sentido, o presente trabalho tem como objetivo geral apresentar os principais aspectos relacionados a geração híbrida de energia no Brasil, de acordo com o preconizado na REN 954/2021 da ANEEL. Como objetivo específico, apresentar o estudo de caso de implantação de uma usina solar fotovoltaica no modelo híbrido com a Usina Hidrelétrica (UHE) Salto, localizada no estado de Goiás, buscando desta forma aproveitar toda a infraestrutura existente de subestações, linhas de transmissão, sistemas auxiliares, bem como os recursos de operação e manutenção já alocados nesta usina hidrelétrica.

2 METODOLOGIA

O trabalho proposto inicia-se com a abordagem conceitual de geração híbrida no Brasil, destacando-se seus principais aspectos normativos. Adicionalmente, serão introduzidos conceitos teóricos relacionados a geração solar e hidráulica individuais e no modelo híbrido. Para tanto, serão consultados os documentos do repositório da ANEEL e da Empresa de Pesquisa Energética (EPE), bem como artigos técnicos e científicos relacionados ao tema. Finalizada a pesquisa bibliográfica, a qual apresentou os conceitos básicos sobre o modelo de geração híbrida, são apresentados os detalhes técnicos da usina hidrelétrica objeto de estudo, tais como localização, potência instalada, configuração do sistema de transmissão e auxiliares, dentre outros dados do empreendimento. Com o objetivo de mapear as médias de vazão e o potencial de geração de energia nos últimos cinco anos na UHE, foram consultados os dados históricos de vazão da bacia do Rio Verde no sítio da Agência Nacional de Águas (ANA). Concluído o levantamento dos dados técnicos da UHE, foram consultados os dados de irradiação solar na região (Caçu, Goiás), tendo em vista subsidiar a elaboração do projeto de implantação da usina solar fotovoltaica no modelo híbrido. Na etapa final, foram apresentados os resultados e as conclusões no que tange a viabilidade do projeto proposto.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 GERAÇÃO HIDRELÉTRICA

Nas usinas hidrelétricas, a energia potencial proveniente da água armazenada nas barragens é convertida em energia cinética e posteriormente em energia elétrica. A capacidade total de geração de energia das usinas hidrelétricas depende de alguns fatores, tais como da queda (nível montante menos nível jusante), da vazão das turbinas, bem como do rendimento do conjunto turina /gerador. A potência de uma usina pode ser calculada a partir da Equação 1 abaixo (Veiga, 2022).

$$P = Q \cdot h \cdot g \cdot \rho \cdot \eta \quad (1)$$

Onde:

P = potência produzida em watts

g = constante de gravidade de 9,81 m/s²

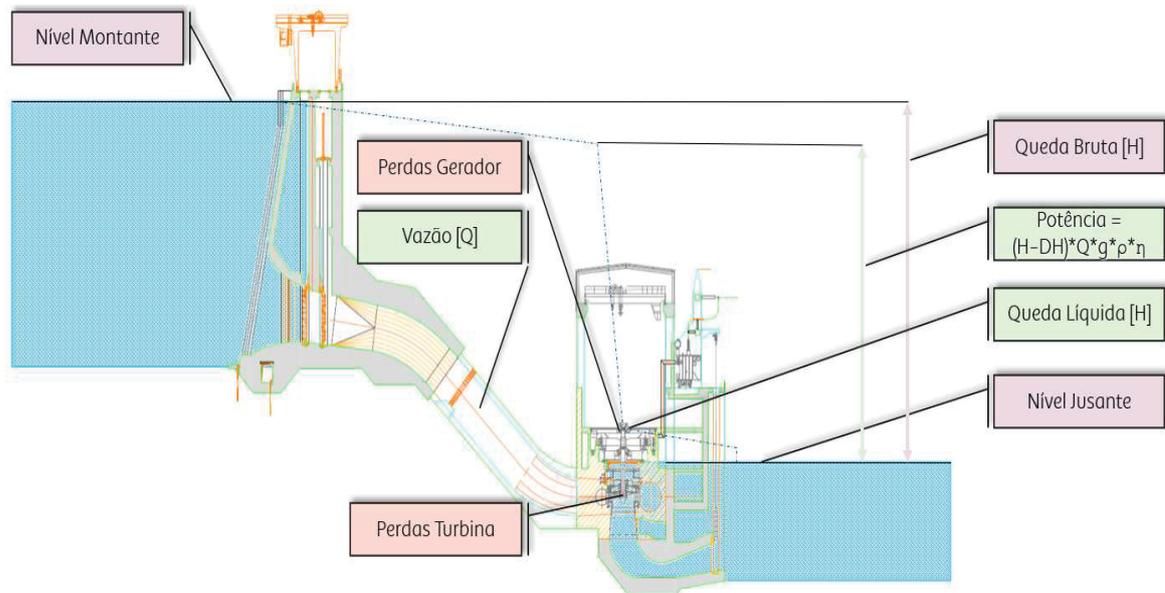
h = altura da queda em metros

ρ = massa específica da água em kg/m³

Q = vazão em m³/s

η = rendimento do conjunto gerador / turbina

FIGURA 1 – USINA HIDRELÉTRICA



FONTE: CTG Brasil (2012).

As usinas hidrelétricas, conforme apresentado na Figura 1, são classificadas com base na potência instalada P (MW), de acordo com os critérios definidos pela REN 875/2020 da ANEEL.

- Centrais Geradoras Hidrelétricas (CGH) - P <1 MW;
- Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCH) - 1 MW <P <30 MW;
- Usinas Hidrelétricas de Energia (UHE) - P >30 MW.

As usinas hidrelétricas também podem ser classificadas com base no tipo de reservatório de acumulação, sendo as usinas a fio d'água as que não possuem capacidade de armazenamento de água em seus reservatórios, ou seja, a vazão afluente da usina é igual a sua vazão defluente (Veiga, 2022). Como exemplo de usinas a fio d'água podemos citar as usinas de Itaipú, na bacia do Rio Paraná, bem como a usina de Capim Branco I, localizada no Rio Araguari. Já as usinas com reservatório de acumulação são aquelas onde é possível armazenar águas nos

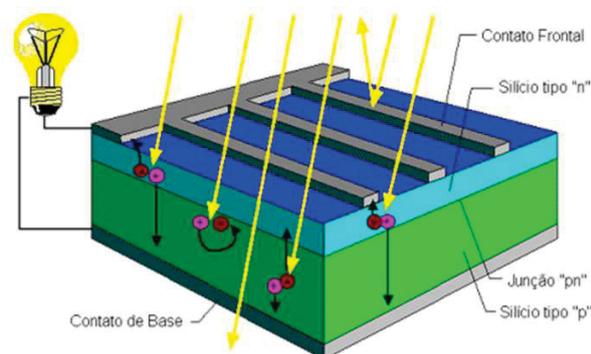
períodos de cheia para ser usada para geração de energia nos períodos de seca (Veiga, 2022). Como exemplo de usinas com reservatório de acumulação, temos a usina de Três Marias, localizada no Rio São Francisco e a usina de São Simão, localizada no Rio Paranaíba.

3.2 GERAÇÃO SOLAR FOTOVOLTAICA

3.2.1 SISTEMA DE GERAÇÃO FOTOVOLTAICA

A geração solar fotovoltaica utiliza como princípio de funcionamento o efeito fotovoltaico apresentado na Figura 2, o qual se caracteriza pelo aparecimento de diferença de potencial elétrico nos extremos de um semicondutor quando este sofre incidência de luz (Cari,2021).

FIGURA 2 – CÉLULA SOLAR FOTOVOLTAICA



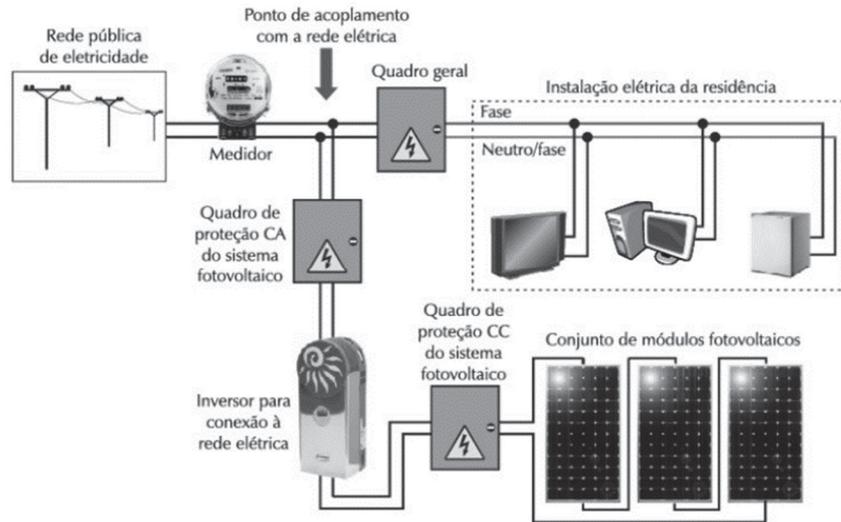
FONTE: Pellegrini (2019)

Neste caso, quando a luz solar atinge uma célula fotovoltaica, ela produz uma pequena corrente elétrica. Essa corrente é recolhida por fios ligados à célula, e transferida para os demais componentes do sistema, sendo assim, quanto mais células fotovoltaicas são ligadas em série ou em paralelo, maior a corrente e tensão produzidas (Pereira et al., 2017).

Os sistemas de geração solar fotovoltaicos, os quais utilizam células fotovoltaicas para gerar energia elétrica, são constituídos por diversos componentes, além dos painéis semicondutores. Estes são constituídos por inversores, medidores, conexões de rede, cabos de corrente contínua e alternada, proteções,

transformadores, dentre outros. Na Figura 3 abaixo, são apresentados os principais componentes de um sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica.

FIGURA 3 – GERAÇÃO SOLAR FOTOVOLTAICA



FONTE: Pellegrini (2019)

Conforme apresentado na Figura 3 acima, a partir da coleta da radiação solar no conjunto de módulos fotovoltaicos, esta é convertida em energia elétrica, a qual é transferida para o inversor. No inversor é realizada a conversão da energia gerada em corrente contínua para energia em corrente alternada, que é o tipo de energia utilizada para alimentar os equipamentos (Pellegrini, 2019).

Os sistemas de geração fotovoltaicas são classificadas com base na sua capacidade instalada, de acordo com critérios definidos pela REN 1.059/2023 da ANEEL:

- Microgeração: potência instalada de até 0,075 MW;
- Minigeração: potência instalada de 0,075 MW a 5 MW;
- Usinas de eletricidade: potência acima de 5 MW.

3.2.2 ETAPAS DE PROJETO DE UMA USINA SOLAR FOTOVOLTAICA (UFV)

O projeto de uma Ufv deve levar em conta fatores básicos, tais como a localização da usina, a geração desejada, bem como os equipamentos a serem utilizados no projeto.

Dentre as principais etapas do projeto de uma UFV, podemos destacar as apresentadas abaixo:

- Escolha dos módulos solares;
- Escolha dos inversores;
- Cálculo do número de módulos solares e configuração, de acordo com as fórmulas abaixo:

$$N_{módulos} = \frac{P_{usina}}{P_{módulo}} \quad (2)$$

Onde:

$N_{módulos}$ = Número de módulos fotovoltaicos do projeto;

P_{usina} = Potência total da usina;

$P_{módulos}$ = Potência nominal do módulo fotovoltaico.

- Dimensionamento do número de *strings* (conjunto de painéis interligados em série).

$$M_{série} = \frac{V_{inv}}{V_{oc}} \quad (3)$$

Onde:

$M_{série}$ = Número de módulos ligados em série;

V_{inv} = Tensão de entrada do inversor.

V_{oc} = Máxima tensão de saída do módulo;

$$N_{strings} = \frac{N_{módulos}}{M_{série}} \quad (4)$$

Onde:

N_{string} = Número de conjuntos de módulos ligados em série do projeto;

$N_{módulos}$ = número total de módulos do projeto;

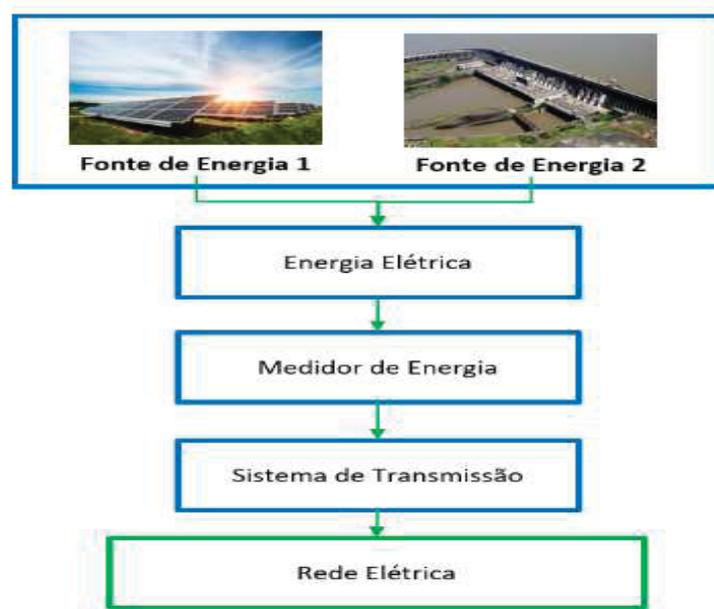
$M_{série}$ = Número de módulos ligados em série.

3.3 USINAS HÍBRIDAS

Usinas híbridas são definidas, de acordo com a REN 954/2021 da ANEEL, como aquelas em que as distintas fontes de energia se combinam ainda no processo de produção de energia elétrica. Enquadram-se nessa categoria, por exemplo, uma planta solar fotovoltaica que compartilhe as instalações de uma usina hidrelétrica, ou ainda, uma usina fotovoltaica que compartilhe os conversores com aerogeradores instalados no mesmo local físico (EPE,2018).

Devido a configuração do sistema de medição, não é possível distinguir qual fonte primária foi responsável pela produção de determinada energia elétrica, conforme apresentado no diagrama da Figura 04 abaixo.

FIGURA 4 – USINAS HÍBRIDAS



FONTE: Adaptado EPE (2018).

No que tange a combinação de usinas no modelo de geração híbrida, esta pode ocorrer de duas formas distintas, conforme EPE (2018):

- Duas usinas novas, sendo negociadas e construídas ao mesmo tempo;
- Uma nova usina construída junto a outra existente, já contratada.

Existem implicações e limitações em ambas as situações. Na segunda opção, é crucial ter cautela ao combinar uma nova usina com uma que já foi contratada anteriormente, para garantir que nenhum termo contratual seja violado. É igualmente importante avaliar se o contrato original inclui provisões para a alocação ou contabilização de eventuais reduções de geração de energia, que podem ocorrer após a adição da segunda usina (EPE, 2018).

No modelo de geração híbrida, onde o empreendimento seja composto por tecnologia de geração hidráulica com potência instalada maior ou igual a 50 MW e com despacho centralizado pelo Operador Nacional do Sistema (ONS), este deverá ter medições distintas por tecnologia de geração, onde a energia proveniente das demais tecnologias não poderão ser destinadas ao Mecanismo de Realocação de Energia (MRE). Adicionalmente, tem-se que a garantia física proveniente de tecnologia não participante do MRE não poderá ser considerada para fins do MRE, de acordo com a REN 954/2021 da ANEEL.

Conforme apresentado em EPE (2022), a hibridização das fontes é uma oportunidade especial para a geração solar, que apresenta sinergias construtivas e operativas com outras fontes. Pode-se mencionar como principal benefício a sinergia horária com a geração eólica e a complementariedade com usinas térmicas e UHEs. Como exemplos de usinas híbridas, destacam-se a usina híbrida eólica e solar em Tacaratu (PE), com capacidade instalada total de 89,9 MW, em operação desde 2015, bem como a usina Solar Flutuante no Reservatório de Sobradinho.

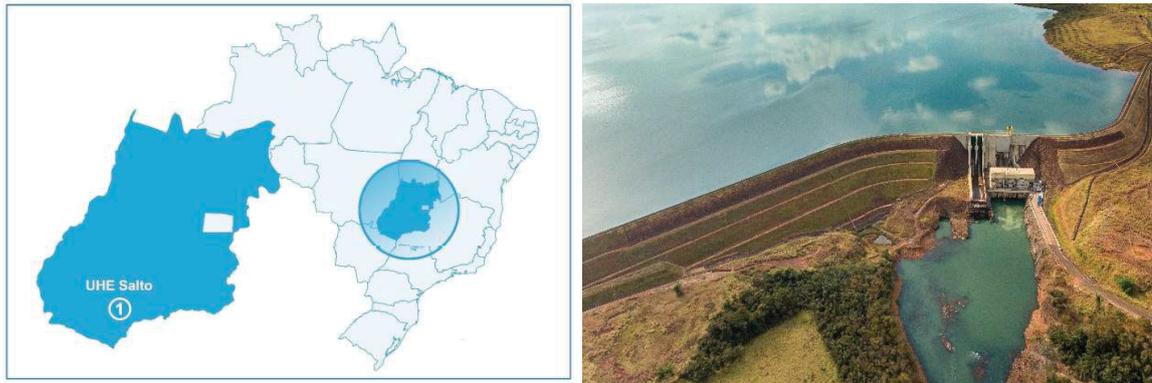
4 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

4.1 DADOS TÉCNICOS UHE SALTO

A Usina Hidrelétrica Salto está localizada nos municípios de Caçu e Itarumã, a 380 km de Goiânia, no estado de Goiás, tendo entrado em operação no dia 25 de maio de 2010 e com contrato de concessão até 2045.

Possui um reservatório de 60,2 quilômetros quadrados, que se estende por 242 quilômetros lineares de bordas. A sua potência instalada é de 116 MW com 67,8 MW de Garantia Física, o que corresponde a 594 GWh/ano. Na Figura 5 é apresentada a localização da UHE Salto e a vista aérea da referida usina.

FIGURA 5 – LOCALIZAÇÃO UHE SALTO



FONTE: CTG (2022).

4.2 HISTÓRICO DE VAZÕES E SIMULAÇÃO DE GERAÇÃO DA UHE SALTO

O comportamento das vazões na UHE foi obtido através dos dados de operação dos reservatórios do Sistema Interligado Nacional (SIN) disponibilizados pela ANA. Conforme apresentado na Figura 6 abaixo, estão disponíveis no sítio da ANA as informações hidrológicas registradas no reservatório da UHE Salto desde o início de sua operação em 2010, considerando-se as médias diárias apuradas.

FIGURA 6 – DADOS HIDROLÓGICOS UHE SALTO

SAR - Sistema de Acompanhamento de Reservatórios v2.2.5 [A-](#) [A](#) [A+](#) [Logar no Sistema](#)

Dados de operação dos reservatórios SIN

[Início](#) / [SIN](#) / [Dados Históricos SIN](#)

Filtros

Estado:

Reservatório*:

Período*: a

Registros

Código do Reservatório	Reservatório	Cota (m)	Afluência (m³/s)	Defluência (m³/s)	Vazão Vertida (m³/s)	Vazão Turbinada (m³/s)	Vazão Natural (m³/s)	Volume Útil (%)	Vazão Incremental (m³/s)	Data da Medição
19031	SALTO	434,70	301,82	232,12	232,12		276,04		302,07	05/01/2010
19031	SALTO	434,75	254,31	236,74	236,74		214,50		254,56	06/01/2010

FONTE: ANA (2023).

De posse dos dados diários de vazão disponíveis no sítio da ANA, utilizou-se o período de 2018 a 2023 para o cálculo das médias mensais das vazões afluentes e

da geração estimada, considerando-se os parâmetros apresentados na Tabela 1 aplicados à Equação 1.

TABELA 1 – DADOS DE PROJETO UHE SALTO

Variável	Valor
Q	Média mensal de vazões (Tabela 1)
h	50 m (conforme dados de projeto da UHE)
g	9,81 m/s ²
ρ	1000 kg/m ³
η	0,95 (conforme dados de projeto da UHE)

FONTE: O autor (2023).

A Tabela 2 abaixo apresenta os valores médios mensais de geração da UHE, calculados a partir dos dados de vazão afluente de 2018 a 2023.

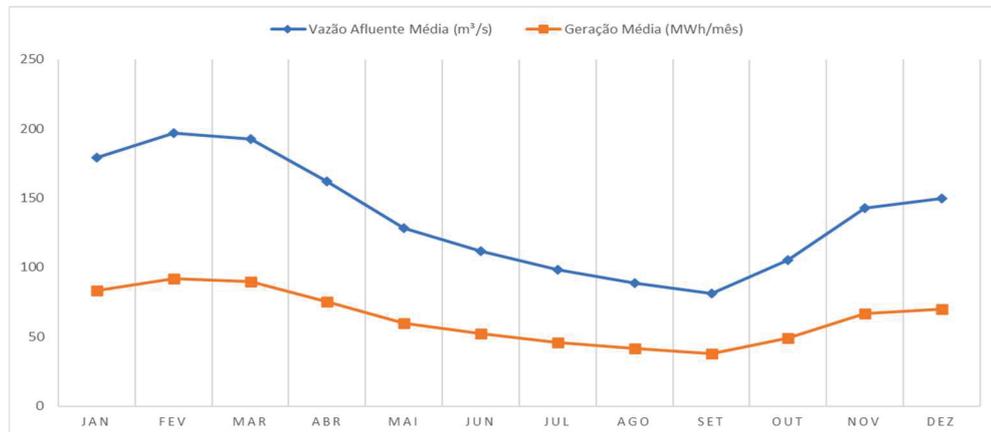
TABELA 2 – VAZÃO AFLUENTE MÉDIA X GERAÇÃO

Mês	Vazão Afluente Média (m ³ /s)	Geração Média (MWh/mês)
jan	179,01	83,41
fev	196,96	91,78
mar	192,37	89,64
abr	161,84	75,41
mai	128,38	59,82
jun	111,59	52,00
jul	98,14	45,73
ago	88,70	41,33
set	80,98	37,73
out	105,11	48,98
nov	142,75	66,52
dez	149,81	69,81

FONTE: O autor (2023).

Utilizando-se os dados da Tabela 2, foi gerado o Gráfico 1, onde são apresentadas as curvas de vazão afluente e geração médias, de janeiro a dezembro, em um formato que facilita a análise das informações.

GRÁFICO 1 – VAZÃO AFLUENTE MÉDIA X GERAÇÃO MÉDIA



FONTE: O autor (2023).

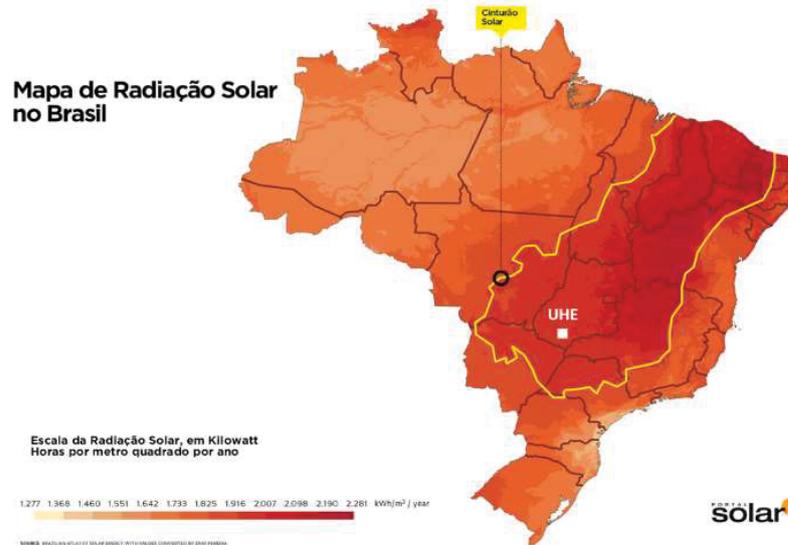
Conforme apresentado no Gráfico 1 acima, o período de janeiro a abril apresenta vazões médias apuradas favoráveis à geração hidráulica. Já de junho a outubro, devido ao período de seca, a energia média gerada se encontra bem abaixo da potência nominal da UHE, fator este importante quando da análise da complementaridade da geração da UHE com a UFV a ser implantada.

4.3 PROJETO USINA SOLAR FOTOVOLTAICA

4.3.1 MAPA SOLARIMÉTRICO DA REGIÃO

No que tange o processo de escolha do local de instalação de uma usina solar fotovoltaica, um dos principais critérios a serem observados é o nível de radiação solar por metro quadrado da área onde será implantada a usina. De acordo com o Atlas Brasileiro de Energia Solar elaborado pelo INPE, a UHE Salto encontra-se localizada no Cinturão Solar, possuindo um dos melhores níveis de radiação solar por metro quadrado do Brasil, conforme apresentado na região delimitada em amarelo na Figura 7.

FIGURA 7 – MAPA SOLARIMÉTRICO



FONTE: Adaptado ADEEL (2023).

Para a definição dos níveis de irradiação do local de instalação da usina solar, utilizou-se o programa *SunData*, disponibilizado pelo Centro de Referência para as Energias Solar e Eólica Sérgio de S. Brito – CRESESB, através do qual realizou-se a simulação da irradiação solar diária média mensal, conforme apresentado na Tabela 3.

TABELA 3 – CÁLCULO IRRADIAÇÃO PLANO INCLINADO UHE SALTO

Estação: Cacu
 Município: Cacu, GO - BRASIL
 Latitude: 18,801° S
 Longitude: 51,149° O
 Distância do ponto de ref. (18,809762° S; 51,168437° O): 2,1 km

#	Ângulo	Inclinação	Irradiação solar diária média mensal [kWh/m ² .dia]												Média	Delta
			Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez		
<input checked="" type="checkbox"/>	Plano Horizontal	0° N	5,72	5,81	5,39	5,09	4,50	4,16	4,42	5,27	5,15	5,57	5,79	6,02	5,24	1,87
<input checked="" type="checkbox"/>	Ângulo igual a latitude	19° N	5,22	5,55	5,48	5,62	5,35	5,14	5,40	6,06	5,40	5,43	5,34	5,42	5,45	,92
<input checked="" type="checkbox"/>	Maior média anual	19° N	5,22	5,55	5,48	5,62	5,35	5,14	5,40	6,06	5,40	5,43	5,34	5,42	5,45	,92
<input checked="" type="checkbox"/>	Maior mínimo mensal	20° N	5,19	5,52	5,47	5,64	5,39	5,18	5,44	6,08	5,40	5,41	5,31	5,38	5,45	,90

FONTE: CRESESB (2023).

4.3.2 DEFINIÇÃO DA POTÊNCIA INSTALADA DA USINA SOLAR

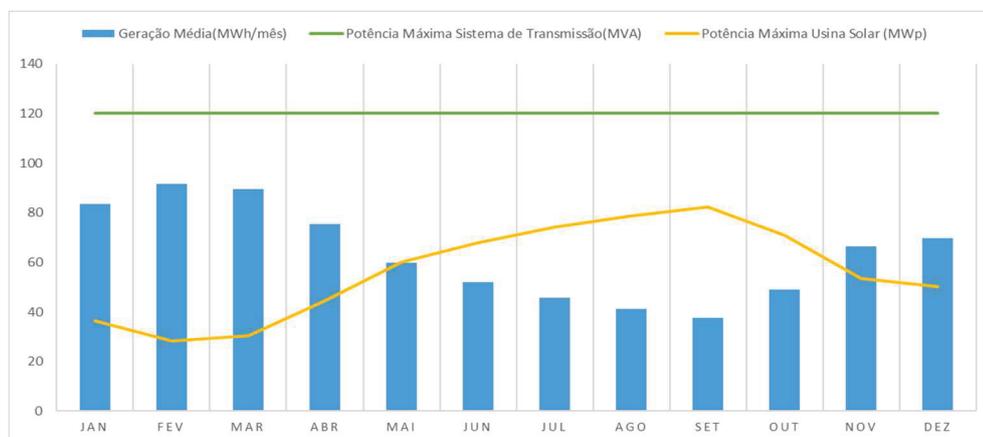
Na etapa de definição da potência instalada da usina solar fotovoltaica, dois critérios de restrição foram adotados com o objetivo de explorar ao máximo a geração completa da usina solar, bem como otimizar os custos de implantação do referido empreendimento. Tais restrições são apresentadas abaixo.

- Critério 01: Considerar o limite máximo de potência despachável do sistema de transmissão na definição da potência instalada da usina solar;
- Critério 02: Utilizar somente o terreno disponível na UHE para a instalação da usina solar.

Para o Critério 01, tem-se que a potência máxima do sistema de transmissão é limitada em 120 MW, conforme dados de projeto da UHE. Considerando-se os valores médios mensais de geração apresentados na Tabela 3, tem-se que a soma desses valores médios de potência da UHE com a potência da usina solar, não devem extrapolar o limite de potência do sistema de transmissão, tendo em vista minimizar o risco de restrição de geração devido à sobrecarga da linha. Isto posto, foi gerado o Gráfico 02, o qual apresenta a potência máxima da usina solar, calculada através da Equação 03 abaixo.

$$Pot. \text{ M}áx. \text{ Usina Solar}_{\text{mensal}} = 120 \text{ MW} - Pot. \text{ M}édia \text{ UHE}_{\text{mensal}} \quad (5)$$

GRÁFICO 2 – POTÊNCIA MÁXIMA USINA SOLAR



FONTE: O autor (2023).

O Critério 02 estabelece a restrição de espaço físico para implantação da usina solar fotovoltaica. Para otimização dos custos de implantação e manutenção, não serão utilizados painéis flutuantes e a área a ser ocupada pela usina solar não pode extrapolar os limites da área interna da UHE, evitando desta forma a necessidade de aquisição de novas terras para instalação da usina. Através de inspeções realizadas em campo, foi definido o local mais adequado (região de relevo

favorável e mais próxima à subestação). Na Figura 8 é apresentada a área escolhida para implantação do projeto, considerando-se as premissas acima expostas.

FIGURA 8 – LOCALIZAÇÃO UHE SALTO

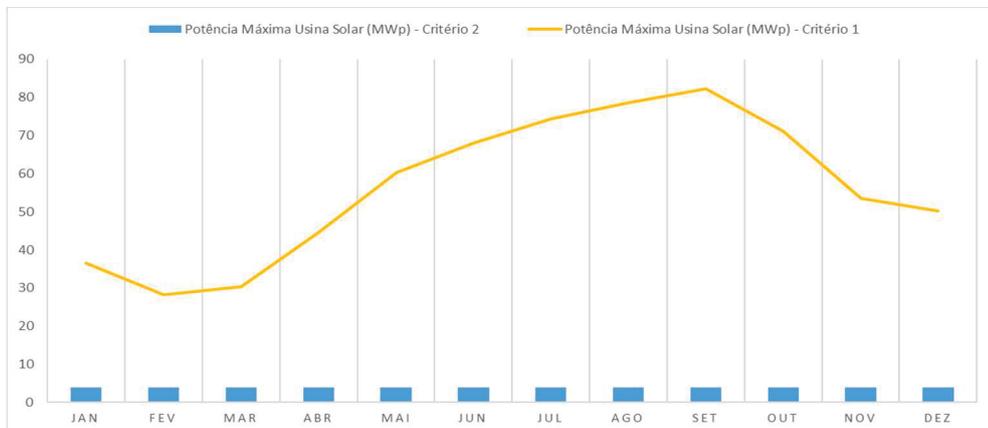


FONTE: Adaptado Google Maps (2023).

Através das coordenadas do perímetro delimitado no mapa, utilizando-se o Google Maps, chegou-se a uma área aproximada de 41.818 m² disponível para implantação do projeto. De acordo com Portal Solar (2023), para uma usina de 1MWp, necessita-se de aproximadamente 10.000 m² de área disponível. Desta forma, para uma área disponível de 41.818 m², tem-se como limite de geração da usina solar o valor aproximado de 4MWp.

Através da análise dos Critérios 1 e 2 apresentados no Gráfico 3 abaixo, tem-se que o limite máximo de potência para a usina solar é de 4MWp.

GRÁFICO 3 – DEFINIÇÃO POTÊNCIA USINA SOLAR



FONTE: O autor (2023).

Conforme apresentado no Gráfico 3 acima, o fator limitante na definição da potência máxima da UFV foi a área disponível para implantação desta, levando-se em conta a não utilização de painéis flutuantes neste projeto.

4.4 USINA HÍBRIDA

4.4.1 PROJETO BÁSICO USINA SOLAR 4MWp

Para a elaboração do projeto básico da usina solar fotovoltaica, após a definição do seu local de instalação e da sua potência, realizou-se a especificação e dimensionamento das quantidades dos seus principais componentes, conforme apresentado na Tabela 4, bem como nas Equações 4, 5, 6 e 7, conforme apresentado abaixo.

TABELA 4 – ESPECIFICAÇÃO EQUIPAMENTOS USINA SOLAR

Equipamento	Modelo	Dados Técnicos	Fabricante
Inversores	SG125HV	V _{inv} =1500 V P _{inv} = 125kW	Sungrow
Módulos Solares	CS3U-355P V5.581_EN Eficiência: 17,89%	V _{oc} =46,8 V	Canadian Solar

FONTE: O autor (2023).

- Número de módulos

$$N_{\text{módulos}} = \frac{P_{\text{usina}}}{P_{\text{módulo}}} \rightarrow N_{\text{módulos}} = \frac{4000 \text{ Kw}}{0,355 \text{ Kw}} \rightarrow N_{\text{módulos}} = \mathbf{11.268 \text{ módulos}}$$

- Módulos em série

$$M_{\text{série}} = \frac{V_{\text{inv}}}{1,1 * V_{\text{oc}}} \rightarrow M_{\text{série}} = \frac{1500 \text{ V}}{51,5 \text{ V}} \rightarrow M_{\text{série}} = \mathbf{29 \text{ módulos}}$$

- Número de *strings*

$$N_{\text{strings}} = \frac{N_{\text{módulos}}}{M_{\text{série}}} \rightarrow N_{\text{strings}} = \frac{11.268}{29} \rightarrow N_{\text{strings}} = \mathbf{388,5 \text{ strings}}$$

Obs.: Devido à necessidade de arredondamento do número de *strings*, de 388,5 para 389, foram realizadas atualizações dos cálculos, conforme abaixo:

$$N_{\text{módulos}} = 389 * 29 \rightarrow N_{\text{módulos}} = \mathbf{11.281 \text{ módulos}}$$

$$P_{\text{usina}} = 11.281 * 355 \rightarrow P_{\text{usina}} = \mathbf{4004,7 \text{ KW}_p}$$

- Número de inversores

$$N_{\text{inv}} = \frac{P_{\text{usina}}}{P_{\text{inv}}} \rightarrow N_{\text{inv}} = \frac{4.004,7}{125} \rightarrow N_{\text{inv}} = \mathbf{32 \text{ inversores}} \quad (6)$$

Para o projeto de interligação da usina solar ao SIN, considerou-se a utilização de um vão existente na subestação de barramento duplo da UHE Salto. No Anexo 01 é apresentado o diagrama unifilar da subestação com o detalhe do ponto de conexão da usina solar (linha tracejada).

4.5 DISCUÇÃO DOS RESULTADOS

Dentre os principais ganhos verificados, destacam-se os relacionados ao compartilhamento dos recursos direcionados às atividades de operação e manutenção das duas usinas, tais como inspeção rotineira, operação das usinas, realização de manutenções preventivas, preditivas e corretivas, conservação e limpeza, dentre outras, o que se reflete em redução dos custos médios de operação e manutenção (R\$/kW/ano) de ambas.

Outro aspecto relevante se refere ao maior uso da capacidade disponível do sistema de transmissão. Conforme apresentado no estudo de geração média anual da usina hidrelétrica, a implantação da usina solar fotovoltaica proporcionaria um melhor aproveitamento do sistema de transmissão através do aumento do fator de capacidade ou entrega de energia, trazendo desta forma ganhos de competitividade para o projeto.

Cabe ressaltar, além dos pontos citados acima, os ganhos relacionados a otimização dos custos de investimento proporcionados pela não utilização de painéis flutuantes, pelo uso das terras disponíveis na usina hidrelétrica para implantação da usina solar, bem como do compartilhamento dos sistemas auxiliares atualmente existentes na UHE.

Ao avaliarmos a geração total das duas fontes, há de se considerar a possibilidade de restrição de geração devido ao excesso de geração simultânea, o que pode ocorrer devido aos limites impostos pela capacidade do sistema de

transmissão. Nas simulações realizadas, onde se utilizou as médias de geração mensais da UHE para avaliação da potência disponível no sistema de transmissão e consequente definição da potência da usina solar, não foi observada restrição de geração. Porém, ao avaliarmos os dados de geração diária, restrições de geração poderão ser verificadas.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O referido artigo apresentou o estudo de implantação de uma usina solar fotovoltaica no modelo híbrido com uma usina hidrelétrica existente. Neste sentido, foram pontuados os principais aspectos relacionados a geração híbrida no Brasil, de acordo com a REN 954/2021 da ANEEL.

Ao se analisar os resultados verificados, estes se apresentaram aderentes ao objetivo de se utilizar de forma mais eficiente os recursos existentes na UHE. Através do compartilhamento dos equipamentos de transmissão, dos serviços auxiliares, bem como das equipes de operação e manutenção, pode-se concluir que o projeto de geração híbrida apresentado tem potencial de otimização dos custos de operação e manutenção do sistema de geração proposto.

Adicionalmente, os estudos de vazão afluente apuradas da UHE demonstraram a viabilidade de se utilizar o período de baixas vazões da UHE Salto para geração de energia solar fotovoltaica, aproveitando desta forma os melhores períodos de insolação para injeção de potência no sistema elétrico, garantido uma maior confiabilidade ao sistema elétrico.

REFERÊNCIAS

ADEEL. **Mapa de Radiação Solar no Brasil**. Disponível em: <https://www.adeel.com.br/mapa-de-radiacao-solar-no-brasil/>. Acesso em: abril de 2023.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS – ANA. **Dados de Operação dos Reservatórios do SIN**. Disponível em: [SAR - Sistema de Acompanhamento de Reservatórios \(ana.gov.br\)](http://ana.gov.br). Acesso em: abril de 2023.

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. **Resolução Normativa n. 875/2020**. Brasília, A Agência, 2020.

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. **Resolução Normativa n. 954/2021**. Brasília, A Agência, 2021.

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. **Resolução Normativa n. 1.059/2023**. Brasília, A Agência, 2023.

CARI, E. P. T., **Introdução à Sistemas Fotovoltaicos, Dimensionamento e Instalação**. Apostila do Departamento de Engenharia Elétrica e da Computação da USP. São Paulo, 2021.

CRESESB - Centro de Referência para as Energias Solar e Eólica Sérgio de S. Brito. **Potencial Solar – SunData v 3.0**. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=sundata/>. Acesso em: abril de 2023.

GOOGLE MAPS – **Localização UHE Salto CTG Brasil**. Disponível em: <https://www.google.com/maps/place/UHE+Salto+CTG+Brasil/@-18.8085375,-51.1704396,15z/data=!4m6!3m5!1s0x949e907c965a4451:0xcc8b7f11d82dea75!8m2!3d-18.8085375!4d-51.1704396!16s%2Fq%2F11cscddwqc>. Acessado em: abril de 2023.

CTG BRASIL. **Projeto UHE Salto – Vista em corte. Goiás**, 2012.

CTG BRASIL – **Relatório Anual de Sustentabilidade**. Disponível em: <https://ri.ctgbr.com.br/>. Acessado em: abril de 2023.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE. **Estudos de Planejamento da Expansão da Geração**. Usinas Híbridas – Uma análise qualitativa de temas regulatórios e comerciais relevantes ao planejamento. EPE-DEE-NT-011/2018-r0, Brasília, 2018.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA – MME; EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA– EPE. **Análise Socioambiental das Fontes Energéticas do PDE 2031 - NT EPE-DEA-SMA-004-2022**. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/spe/publicacoes/plano-decenal-de-expansao-de-energia/pde-2031/estudos-de-apoio/nt-epe-dea-sma-004-2022-analise-socioambiental-das-fontes-energeticas-do-pde-2031.pdf/view>. Acesso em: abril de 2023.

PELLEGRINI, L. V. **Projeto de Usina Fotovoltaica de 5 MWp em São Luiz do Purunã**. Monografia. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Paraná, 2019.

PEREIRA, E. B., MARTINS, F. R., GONÇALVES, A. R., COSTA, R. S., LIMA, F. J. L., RÜTHER, R., ABREU, S. L., TIEPOLO, G. M., PEREIRA, S. V., & SOUZA, J. G. (2017). **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. São Paulo: Editora INPE.

PORTAL SOLAR. **Energia Solar na Construção – Preparando a propriedade**. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/energia-solar-na-construcao-do-imovel.html>. Acesso em: abril de 2023.

VEIGA, B. V., **Pequenas Centrais Hidrelétricas Rurais**. Apostila do MBA em Gestão Estratégica em Energias Naturais Renováveis. Universidade Federal do Paraná, Paraná, 2022.

