

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

CAMPUS LITORAL NORTE

DEPARTAMENTO INTERDISCIPLINAR

ENGENHARIA DE GESTÃO DE ENERGIA

ANDREI FERREIRA DA LUZ

**CENTRAIS GERADORAS HÍBRIDAS E ASSOCIADAS:
DESAFIOS, OPORTUNIDADES E O NOVO CENÁRIO PARA
PROJETOS RENOVÁVEIS NA MATRIZ ENERGÉTICA
BRASILEIRA COM A REN 954/2021**

Tramandaí

2022

ANDREI FERREIRA DA LUZ

**CENTRAIS GERADORAS HÍBRIDAS E ASSOCIADAS:
DESAFIOS, OPORTUNIDADES E O NOVO CENÁRIO PARA
PROJETOS RENOVÁVEIS NA MATRIZ ENERGÉTICA
BRASILEIRA COM A REN 954/2021**

Este trabalho foi julgado adequado para fazer jus aos créditos da atividade de ensino “Trabalho de Conclusão de Curso”, do Departamento Interdisciplinar e aprovado em sua forma final pelo(a) Orientador(a) e pela Banca Examinadora.

Orientador(a): Profa. Dra Aline Cristiane Pan, UFRGS.

Doutora pela Universidade Politécnica de Madri - Espanha.

Banca Examinadora:

Me Frederico Carbonera Boschin, Noale Energia.

Mestre pela Universidade de Lisboa – Lisboa, Portugal.

Prof. Dr. Fernando Soares dos Reis, UFRGS.

Doutor pela Universidade Politécnica de Madri – Madri, Espanha.

Profa. Dra. Gabriela Pereira da Silva Maciel, UFRGS.

Doutora pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Porto Alegre, Brasil.

Tramandaí-RS, 6 de maio de 2022.

CENTRAIS GERADORAS HÍBRIDAS E ASSOCIADAS: DESAFIOS, OPORTUNIDADES E O NOVO CENÁRIO PARA PROJETOS RENOVÁVEIS NA MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEIRA COM A REN 954/2021

Andrei Ferreira da Luz¹ – andrei.luz@ufrgs.br

Aline Cristiane Pan¹ – aline.pan@ufrgs

¹Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Departamento Interdisciplinar – Engenharia de Gestão de Energia.

Resumo: Em dezembro de 2021, foi publicada a Resolução Normativa 954, (REN 954/2021), estabelecendo o tratamento regulatório para implantação de Centrais Geradoras Híbridas e Centrais Geradoras Associadas, representando uma alternativa para o uso eficiente da matriz energética nacional, uma vez que elas podem se aproveitar da complementaridade temporal entre diferentes fontes de geração combinada com a otimização do uso da rede de transmissão. Alterando as RENs 77/2004, 247/2006, 559/2013, 583/2013, 666/2015 e a 876/2020, a nova norma formula um novo mercado a ser explorado pelo setor elétrico, definindo a associação com centrais geradoras existentes e com usinas hidrelétricas participantes do Mecanismo de Realocação de Energia, também regulamenta a aplicação dos descontos de Tarifa de Uso do Sistema Elétrico de Transmissão e comercialização junto aos consumidores especiais com fonte incentivada. Sendo assim, o objetivo deste trabalho é analisar a REN 954/2021, o novo cenário para o mercado brasileiro de energia, possíveis impactos à rede e ao sistema tarifário. Contudo, alguns temas entendidos no setor como necessários ainda aguardam marcos regulatórios, como o caso da garantia física de energia, definição dos cortes de energia quando há excesso de geração, relação entre fontes despacháveis e não-despacháveis, assim como o montante de uso do sistema de distribuição. Considerando o crescimento da geração distribuída brasileira, é de suma importância a regulação para os montantes de distribuição, assim dando legalidade e podendo expandir mercados como os de armazenamento de energia no caso brasileiro. Com a introdução do tema com a perspectiva internacional e de estudos no caso brasileiro, ao fazer a análise da REN 954/2021, entende-se que apesar de pontos ainda em aberto para regulamentação, institui e estimula um novo mercado a ser explorado pelo setor elétrico brasileiro, podendo também reduzir impactos ambientais, redução de custos de energia por ser mais competitivo e desenvolver a nação.

Palavras-chave: Centrais Geradoras Híbridas, Centrais Geradoras Associadas, REN 954/2021.

Abstract: *In December 2021, Normative Resolution 954 (REN 954/2021) was published, establishing the regulatory treatment for the implementation of Hybrid Generating Plants and Associated Generating Plants, representing an alternative for the efficient use of the national energy matrix, since they can take advantage of the temporal complementarity between different generation sources combined with the optimization of the use of the transmission grid. Amending RENs 77/2004, 247/2006, 559/2013, 583/2013, 666/2015 and the 876/2020, the new standard formulates a new market to be explored by the electric sector, defining the association with existing generating plants and with hydroelectric plants participating in the Energy Reallocation Mechanism, also regulating the application of the discounts of the Transmission Electric System Use Tariff and commercialization with special consumers with an incentive source. Thus, the objective of this work is to analyze REN 954/2021, the new scenario for the Brazilian energy market, possible impacts on the grid and the tariff system. However, some issues understood in the sector as necessary still await regulatory milestones, such as the case of physical guarantee of energy, definition of power cuts when there is excess generation, the relationship between dispatchable and non-dispatchable sources, as well as the amount of use of the distribution system. Considering the growth of distributed generation in Brazil, it is of utmost importance to next regulate the distribution amounts, thus giving a legality and being able to expand markets such as energy storage in the Brazilian case. With the introduction of the theme with the international perspective and studies in the Brazilian case, when analyzing the REN 954/2021, it is understood that despite the points still open for regulation, it institutes and stimulates a new market to be explored by the Brazilian electrical sector, and can also reduce environmental impacts, reduce energy costs by being more competitive and develop the nation.*

Keywords: *Hybrid Generating Plants, Associated Generating Plants, REN 954/2021.*

1. INTRODUÇÃO

De acordo com estimativa realizada pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2021) [1], o consumo de energia elétrica interligado ao Sistema Interligado Nacional (SIN) pode ter aumento para o período até 2025, com crescimento médio anual da carga de energia do SIN de 3,6% ao ano, representando uma expansão média anual nos cinco anos de 2.561MW médios atingindo em 2025 uma carga de 79.600MW médios no SIN. Para suprir tal aumento no consumo é necessário o aumento da produção de energia, segundo Neto *et al.* [2], desde 2001 o governo brasileiro realizou diversas políticas de expansão do setor elétrico e principalmente voltado à fonte eólica, considerando a complementação que tal fonte proporciona às fontes térmicas e hidrelétricas nos períodos de seca da região Nordeste.

A produção de energia elétrica, considerando apenas uma fonte iniciou-se de forma experimental em 1886 nos Estados Unidos, posteriormente a primeira usina hidrelétrica de grande porte foi construída na cidade de *Niagara Falls*, no Estado de Nova Iorque por meados de 1898 [3]. A partir deste marco, usinas de diferentes fontes foram sendo experimentadas e construídas, até que chegamos no século XXI com uma grande diversificação na matriz energética.

Desde o início da existência do homem, seu desenvolvimento está associado em grande parte pelo uso de diferentes formas de energia, segundo a disponibilidade de cada momento e lugar [4]. Avanços na agricultura, medicina, processos industriais ao longo dos anos refletiram em aumento da densidade populacional no mundo todo, e por consequência, a necessidade de expansão de acesso à energia elétrica tem crescido. Porém, mundialmente as fontes de produção de energia elétrica são predominantemente de origem fóssil e não renovável, como o petróleo, carvão mineral e o gás natural. A produção massiva de energia elétrica através de tais combustíveis tem causado grandes impactos ao meio ambiente, tendo como um dos mais preocupantes os “gases do efeito estufa”, com destaque ao dióxido de carbono [5].

No caso brasileiro, com uma das maiores matrizes renováveis do mundo [6], têm ganhado destaque o debate sobre a complementação de mais de uma fonte em uma mesma usina, chamadas de usinas híbridas. Isso se dá também pela grande disponibilidade de recursos renováveis no país e pelo complemento de produção de energia, otimizando a rede de transmissão, que pode ser resultado de tal combinação.

Neste sentido, o presente trabalho tem como objetivo analisar a Resolução Normativa 954/2021 que traz as definições e processos legais para usinas híbridas e associadas, dadas suas diferenças contratuais, de medição e uso da rede, assim como o novo cenário para o mercado de energia brasileiro para empreendimentos de grande porte, possíveis impactos à rede e ao sistema tarifário. Com isso, inicia-se abordando conceitualmente as tipologias de usinas de mais de uma fonte primária de produção de energia e sua ocorrência no cenário mundial e brasileiro, passando pela análise da norma regulamentadora e finalizando com discussões acerca de estudos de casos e novos cenários nesse mercado brasileiro.

2. USINAS HÍBRIDAS E ASSOCIADAS

As usinas híbridas têm ganhado notoriedade no cenário internacional de energia [7] devido a sua potencialidade de combinar duas ou mais formas de produção de energia ou de potência, e ainda incluir o armazenamento. Geralmente, considerando a transição energética, este tipo de processo pressupõe um componente renovável, balanceado por meio de uma segunda forma de produção ou armazenamento, também podendo fornecer outras formas de energia, como calor para algumas aplicações [8]. Porém, um dos problemas encontrados na utilização das produções de energias renováveis é a característica intermitente de algumas fontes, não permitindo produzir energia elétrica de forma constante. No caso da energia solar fotovoltaica, o pico de saída não é obtido em dias nublados e a noite não produz energia, turbinas eólicas, por questão de segurança, possuem limite de velocidade de vento para operação, assim como plantas hidrelétricas que dependem do índice de precipitação e outros fatores ambientais. Para mitigar esses riscos, associados à flutuação da geração, a hibridização, ou seja, a integração de diferentes fontes renováveis em um único sistema conectadas entre si por meio de subestações, com elas gerando e fornecendo fluxo de energia para a rede, tem ganhado força no setor elétrico [9].

Do ponto de vista ambiental, as usinas com altas participações de geração renovável, ao mesmo passo que possuem alta disponibilidade prometem reduzir emissões de gases de efeito estufa, além dos custos gerais de geração [10] [11]. Essa economia pode ser exemplificada através de um estudo onde constatou que pequenas ilhas e Pequenos Estados Insulares em Desenvolvimento (PEID), localizados nas Américas, Central e Sul, no continente africano, asiático e na Oceania, que poderiam economizar 10 bilhões de dólares por ano em gastos com combustível se mudarem seus sistemas de geração de energia para as renováveis, ainda sem contar quanto a hibridização, onde pode ser ainda maior tal economia [12].

Ao longo da história, essa combinação de fontes de energia distintas tem sido mais comum em sistemas elétricos de menor porte, em especial em localidades pouco povoadas e distantes do sistema elétrico principal. Para tais casos, os benefícios são evidentes, além dos benefícios ambientais tem-se uma continuidade, a qual reflete na garantia de suprimento mais significativa se comparada a locais com apenas uma fonte, ainda mais se tais locais apresentarem uma maior escassez de recursos energéticos e certa limitação no uso de sua área.

Ao considerarmos sistemas maiores, além das redes de transmissão permitirem que os recursos sejam acessados pelo operador, localizados no mesmo ponto físico ou não, é possível listar outros benefícios com a utilização de mais de uma fonte no mesmo sistema de produção. Dentre esses benefícios, pode-se destacar o aproveitamento do terreno, sinergias de construção, operação e manutenção. Além da possibilidade de uma produção final de energia mais constante, considerando os complementos de periodicidade e sazonalidade entre os recursos disponíveis.

De forma resumida e adaptado de EPE [13], a Fig. 1 representa a tipologia e classificação dessas formas de produção de energia, que podem ser definidas como:

- Usinas Híbridas (UGHs): combinadas já no processo de produção de energia elétrica, além do terreno, e sistema de conexão e acesso à rede, da mesma forma que a remuneração da usina que entende ser única;
- Usinas Associadas: usinas com localidades próximas ou até mesmo no mesmo terreno, compartilham fisicamente e contratualmente a infraestrutura de conexão e acesso à rede. Em sua contratação, há duas possibilidades, sendo contratadas conjuntamente ou, em caso de medição individualizada, cada fonte sendo contratada e remunerada individualmente;
- Usinas Adjacentes: construídas em localidades próximas, podendo compartilhar o mesmo terreno e as instalações de interesse restrito, porém do ponto de vista da conexão, cada usina se conecta a uma capacidade de uso da rede (Rede Básica ou de Distribuição) compatível com sua potência instalada. Em relação ao seu faturamento e preço da energia, para cada usina é feito necessariamente de forma separada;
- Portfólios Comerciais: natureza apenas comercial-contratual, possuindo recursos complementares, independentemente de estar próximas entre si.

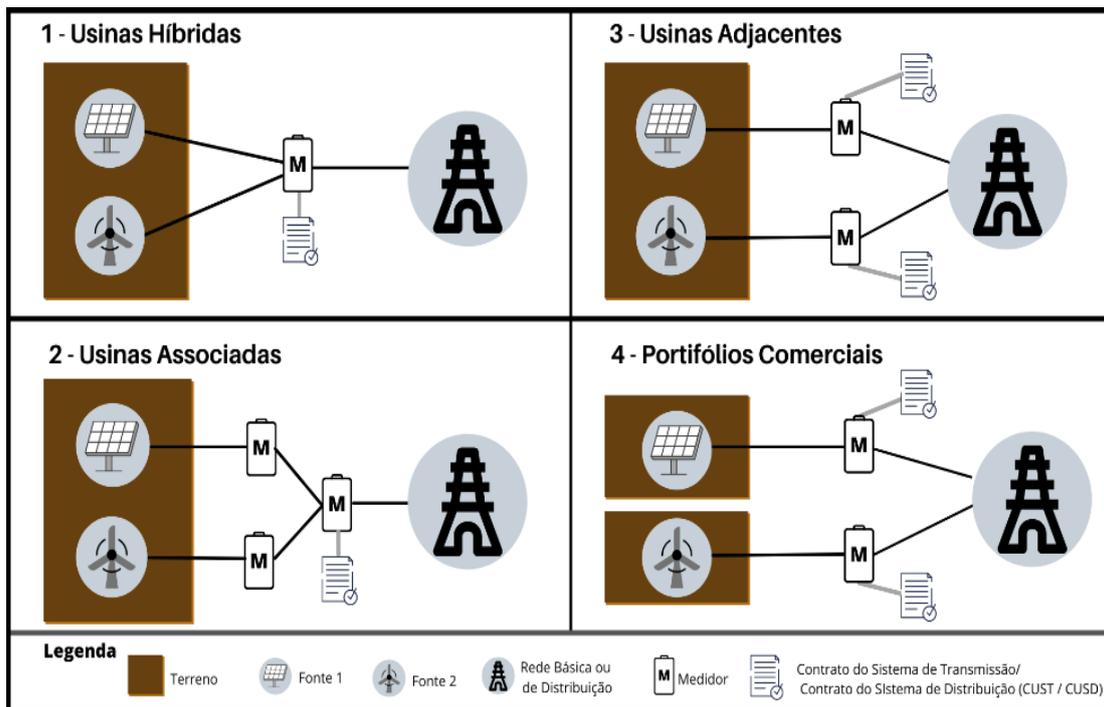


Figura 1 - Tipologias de produção de energia híbrida.
Adaptado de EPE [13].

Pode-se assim perceber que quando se fala em combinação de diferentes fontes de energia, há uma gama de nomenclaturas e processos distintos, sendo formalmente energia híbrida aquela que compartilha os equipamentos já na produção de energia. Contudo, o benefício sobre a diversificação das fontes para uma garantia de suprimento, dada as peculiaridades de sazonalidade, modulação e perfil de produção instantâneo, são vantagens não somente para projetos híbridos, mas também para aqueles que apresentarem diferentes fontes, independentemente de estarem próximos ou combinados.

Já sobre o maior uso na capacidade disponível do sistema de transmissão e/ou distribuição, para usinas adjacentes não há essa vantagem, pois, cada usina separadamente conta com o uso da rede conforme sua potência nominal. No caso das Associadas ou Híbridas, esse benefício pode ser notado, pois compartilham o acesso à rede, e com essa complementaridade, de geração em uma fonte enquanto outra está em sua produção reduzida, não seria necessário investimento em novas infraestruturas. Outra diferença se dá na análise das demais vantagens, em que as tipologias, com exceção dos Portfólios Comerciais, podem trazer para o sistema como: a otimização do uso da área disponível, sinergias de logística, de operação e planejamento de implantação. Nas UGHs e Associadas, o compartilhamento de equipamentos do sistema de interesse restrito pode ser dito como outra vantagem a planta de produção, porém, os valores de corte de geração quando ocorrer de elevada geração simultânea não deve ser subestimado, ou seja, a contratação do uso da rede também não pode ser subdimensionada, ou o sistema pode trazer danos, como sobrecarga do sistema e perda de eficiência [13]. Seguindo as dificuldades de implementação destas novas formas de produção de energia, percebe-se as experiências internacionais, os pontos críticos são principalmente os comerciais e regulatórios [16].

2.1 USINAS HÍBRIDAS NO MUNDO

A título de exemplo, na maioria dos países do continente europeu, não há tratamento regulatório diferenciado para usinas “híbridas” eólicas-solares, sendo tratadas habitualmente como solares ou eólicas separadamente, com ou sem inclusão de armazenamento de energia [14]. Ainda sobre o caso europeu, é contado apenas 7 usinas eólicas-solares híbridas e 22 parques eólicos com armazenamento, e no caso de Irlanda, Portugal e Espanha, os desenvolvedores já podem instalar e conectar mais capacidade total de energia renovável do que a contratada com a rede, dado que a produção total de energia da usina não excede a capacidade contratada [15], exemplo que outros países podem seguir.

Segundo a EPE [16], a maioria dos projetos híbridos no mundo dependeu de subsídios ou regulações favoráveis que motivaram o mercado. Dos problemas regulatórios, levando em consideração que historicamente os protocolos e regulações consideram apenas uma fonte de produção de energia e sua potência instalada, pode-se citar os seguintes segundo EPE [16] e ANEEL [17]:

- Acesso ao sistema elétrico;
- Processo de outorga perante o órgão regulador;
- Definição de garantia física (GF);
- Precificação para comercialização e participação em leilões.

Em alguns deles o preço da energia foi questionado e até mesmo judicializado, como em um projeto americano chamado *Red Lake Falls Project* (projeto quedas do lago vermelho), onde a hibridização ocorreu em adicionar 1MWp fotovoltaico a 4,6MW de eólicas existentes [16], este caso se tornou alvo de disputa judicial entre a distribuidora e os proprietários da usina híbrida pela divergência no preço da energia, em que as empresas discordaram sobre o custo evitado para a distribuidora, que serve como base para o preço da energia que deveriam ser pago ao gerador, por fim a Comissão de Utilidades Públicas deliberou por um preço inferior ao pleiteado pelo gerador que acabou recorrendo em outras instâncias [18]. No caso americano, conforme BERKELEY LAB [19], usinas híbridas com maior capacidade de produção de energia até finais de 2020 foram a fóssil com a fotovoltaica, com cerca de 9,3GW, com destaque ainda para nuclear com recurso fóssil com 7,8GW de capacidade de geração. Dentre as renováveis, há destaque para hidrelétricas com biomassa, tendo nove projetos e 381MW, eólica-fotovoltaica com 852MW com 7 projetos, e as que inclui armazenamento de energia com 238MW e apenas 2 projetos. A Fig.2 apresenta o panorama global de projetos eólico-fotovoltaico com sistema de armazenamento de energia, sendo o mais utilizado nos EUA com grande margem, as baterias de íon-lítio.



Figura 2 - Plantas híbridas eólicas-fotovoltaicas e com baterias. Fonte: WINDEUROPE [20].

Em outro cenário, como exemplo a Índia em 2019, constando quatro usinas em operação do modelo eólica-fotovoltaica, sendo duas delas com armazenamento, apesar de buscar utilizar de mecanismos de mercado como os leilões, foi observada uma dificuldade no mercado quanto a aderência e competitividade, como também críticas aos preços propostos [16]. Seguindo no exemplo do país asiático, a principal motivação, diferente do contexto brasileiro, é a falta de terras tanto para instalação quanto para expansão dos sistemas de transmissão e distribuição, sendo a hibridização uma estratégia encontrada para suprir as expectativas de expansão da capacidade renovável no país [16]. Já em 2020 e início de 2021, foi anunciado na Índia o início de obras de um enorme projeto solar-eólico de 30GW no estado de Gujarat [20]. Quando falado em projetos híbridos combinando energia eólica, fotovoltaica e/ou armazenamento, ainda em 2019, foram iniciados projetos na Austrália, Holanda, Filipinas, Estados Unidos e Índia [21], enquanto os mercados de coletores

solares térmicos híbridos cresceram na China, França, Alemanha, Gana e Holanda durante 2020 [20]. Trazendo um panorama de alguns projetos em destaque [14]:

- *Cynog Park* no Reino Unido, com 3,6MW eólico e 4,95MWp fotovoltaico, em operação desde 2016;
- *Kavithal* na Índia, projeto eólico-fotovoltaico com 50MW de capacidade de produção eólica e 28,8MW fotovoltaico;
- *Tilos* na Grécia, com capacidade de 0,8MW eólico e 0,16MW fotovoltaico além de armazenamento de 0,8/2,4MW/MWh;
- *Graciosa* em Portugal, sendo 4,5 MW eólico, 1MW fotovoltaico e armazenamento de 6/3,2MW/MWh;
- *La Manuela* na Espanha, com capacidade de 0,85MW eólico e 0,245MW fotovoltaico além de armazenamento de 0,4/2,5MW/MWh;

De modo geral, o interesse na produção de energia por meio de fontes renováveis tem aumentado não apenas pelas externalidades ambientais positivas, mas também por trazer resultados macroeconômicos significativos, desenvolvendo a nação. Onde pode-se citar o impacto no produto interno bruto, empregabilidade, balança comercial, dentre outros existentes [22]. Portanto, apesar das barreiras regulatórias e comerciais, se torna inevitável avançar em novas produções de energia para um abastecimento mais seguro, tanto para os consumidores, quanto para a conservação do meio ambiente.

2.2 USINAS HÍBRIDAS NO BRASIL

No caso do setor elétrico brasileiro, essa combinação entre diferentes fontes de produção tem sido debatida nos últimos anos. Segundo a ANEEL [23], o sistema isolado já conta com usinas híbridas desde 2014, pelos editais dos leilões e nas outorgas. Neste contexto, em locais isolados ou de difícil acesso a eletricidade, foi focado majoritariamente em usinas termelétricas a diesel com adição de outra fonte de geração limpa, como eólica ou solar fotovoltaica. Porém, a existência de sistemas híbridos, mesmo que isolados, já é uma realidade brasileira desde meados de 1992 com a adição de geração eólica em uma planta a diesel em Fernando de Noronha. De forma resumida, pode-se perceber alguns dos projetos precursores e suas tecnologias na Tab. 1, considerando a forma de produção: eólico (E), diesel (D), fotovoltaico (FV).

Apesar de ser uma das primeiras experiências híbridas brasileiras, a usina diesel-eólica de Fernando de Noronha que continha duas torres eólicas, com a ocorrência de um raio em 2009, ambas as torres tiveram de ser removidas [24]. Outro exemplo citado, da usina diesel-fotovoltaica da Vila de Campinas, foi resultado de um trabalho de cooperação técnica do Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL) e do Departamento de Energia dos Estados Unidos, através do *National Renewable Energy Laboratory* (NREL), sendo uma estação experimental, monitorada via satélite pela empresa americana [25]. No caso da usina híbrida de Tacaratu (PE), sendo a primeira do Brasil a unir geração solar e eólica, inaugurada em 2015, tem uma perspectiva de gerar aproximadamente 340GWh de energia por ano, quantidade suficiente para abastecer anualmente cerca de 250 mil residências brasileiras [26].

Em nota mais recente, EPE [27] de 2022, fazendo uma análise socioambiental das fontes energéticas trazidas pelo Plano Decenal de Expansão de Energia 2031, já são citados exemplos em andamento de usinas híbridas, com fontes solar e eólica em Tacaratu (PE) com capacidade instalada total de 89,9MW, em operação desde 2015, e também a Solar Flutuante no Reservatório de Sobradinho (BA), essa com capacidade instalada de cerca de 2,5MWp. Com isso, pode-se perceber que em menores escalas, o Brasil já caminha para uma mudança na produção e combinação de fontes, porém, ao falar em grandes complexos, essa expansão se limitava por não haver norma regulamentadora.

A partir da Tab. 1, adaptado de Barbosa *et al.* [29], pode-se perceber a existência de sistemas isolados, ligados ao argumento de dificuldade no acesso à rede elétrica, normalmente por baterias, que são parte de um processo de produção de energia híbrido. Outros sistemas já seguem no processo legal de tramitação, e também no horizonte próximo de algumas grandes empresas, como no caso da Igás [28], onde já possuem um estudo em andamento no Oeste de São Paulo, visando o aproveitamento de biomassa e biometano da digestão de vinhaça, contando com 2MW de potência cada uma de duas plantas de empresas do setor sucroalcooleiro que desejam suprir e que a planta planejada pode gerar, só com o bagaço, em torno de 55 a 65kWh por tonelada de cana processada. Nesse mesmo contexto, ao inserir biometano numa proporção de 20% em comparação ao bagaço, o sistema pode chegar a um patamar entre 115 a 125kWh por tonelada de cana processada.

Em Minas Gerais [28], a Cemig GT desenvolve vários projetos de usinas solares flutuantes, entre eles as UFVs Três Marias I e II, sobre o no espelho d'água do reservatório da UHE Três Marias, projetos que já contam com Despacho de Registro do Requerimento de Outorga (DRO), documento que, apesar de não ser obrigatório para o pedido de outorga de autorização, tem como finalidade, dentre outras, facilitar a obtenção de eventuais pedidos de informação de acesso pela concessionária de transmissão de energia elétrica ou pelo ONS, e facilitar a obtenção de licenças e/ou autorizações dos órgãos responsáveis pelo licenciamento ambiental ou de outros órgãos públicos federais, estaduais, municipais ou do Distrito Federal. De capacidade instalada, tais plantas no estado mineiro terão de 60MW e 120MW, com previsão de operação a partir de 2023, com investimentos na ordem de 1 bilhão de reais.

O mercado brasileiro já sinaliza para o mercado híbrido [28], um exemplo disso é da empresa BYD Brasil que firmou parceria com a Cemig e a Alsol para implantação em Uberlândia (MG) de sistemas de armazenamento mais energia fotovoltaica em container implementado, tal projeto teve um aporte total de R\$ 22,7 milhões e opera desde 2019. Movimentação essa que mostra um cenário já presenciado em outros países, onde o armazenamento ganha um espaço em instalações de energia solar fotovoltaica.

Tabela 1 - Projetos de Sistemas Híbridos no Brasil, estado localizado, capacidade e armazenamento. Adaptado de Barbosa *et al.* [29].

Sistemas Híbridos de Energia (início de operação)	Estado brasileiro localizado	Capacidade	Armazenamento
E-D Fernando de Noronha (1992)	Pernambuco	3,3MW (300kW (E) e 3MW (D)) (2001);	-
D-FV Vila de Campinas (1994)	Amazonas	60kW (D) e 51,2kWp (FV);	120 unidades chumbo-ácido 8Vcc, 200Ah;
FV-E Vila de Joanes (1997)	Pará	10,2kWp (FV), quatro aerogeradores de 10kW (1997);	200 unidades seladas reguladas a válvula 2Vcc /1.000Ah;
E-D da vila de Praia-Grande (1998)	Pará	10kW (E) e dois grupos geradores a diesel de 7,5kVA;	20 unidades chumbo-ácido 12 Vcc /150Ah;
FV-E-D de Tamaruteua (1999)	Pará	3,84kWp (FV), dois aerogeradores de 10kW (7,5kW de referência) e um grupo gerador a diesel de 40kVA (2005);	64 unidades de chumbo-ácido 12Vcc /185Ah (2005);
FV-D de Araras (2001)	Rondônia	20,48kWp (FV) e três grupos geradores de 60kVA (2001);	-
FV-E-D de São Tomé (2003)	Pará	3,2kWp (FV), um aerogerador de 10kW (7,5kW de referência) e 20kVA (D);	40 unidades de chumbo-ácido de 12Vcc/150Ah;
FV-E da comunidade de Boa Esperança (2006)	Tocantins	Três aerogeradores de 1kW e 3,36kWp (FV);	Banco de baterias com 32 unidades estacionárias de 150Ah cada;
SHE do Centro de Pesquisas Canguçu (CPC) (2008)	Tocantins	19,096kWp (FV), uma célula a combustível do tipo PEM ¹ de 5kW de potência máxima, um eletrolisador do tipo PEM de 6kW, dois cilindros de H ₂ de 49 litros;	Banco de baterias com 16 unidades de chumbo-ácido de 12Vcc/195 Ah;
FV-E-D na vila de Sucuriju (2008)	Amapá	18kWp (FV), cinco aerogeradores de 10kW (7,5kW de referência) e 48kW (D);	Banco de baterias com 56 unidades de 460Ah;
FV-E-D na ilha de Lençóis (2008)	Maranhão	21kWp (FV), três aerogeradores de 7,5kW e 53kVA (D);	Banco de baterias com 120 unidades de 150Ah;
FV-E-D Araras Grande Norte (AGN) (2012)	Pará	15,2kWp (FV); 6kW (E); 10kVA (D);	Banco de baterias dimensionado para atendimento com cerca de 38 unidades consumidoras;
FV-D da vila de São Francisco de Iratapuru (2015)	Amapá	52,6kWp (FV), dois grupos geradores a diesel de 60kVA;	Três bancos de baterias de 3.000Ah;
FV-E de Tacaratu (2015)	Pernambuco	11MWp (FV) e 80MW (E);	-

Legenda: (E) Eólico, (FV) Fotovoltaico, (D) Diesel-elétrica.

¹ A célula do tipo PEM possui como principal característica uma membrana de polímero impermeável a gases, mas que possibilita a passagem de prótons em sua estrutura. Esta membrana é envolvida nos dois lados por uma camada porosa de eletrólito composto tipicamente por papel de fibra de carbono, onde a inserção dos gases de hidrogênio e oxigênio é comprimido. Na junção do eletrólito e da membrana, possui um catalisador de platina para acelerar a reação química na quebra das moléculas dos gases hidrogênio e oxigênio. Fonte: Franchi, T. P., 2009. *Utilização de células a combustível tipo PEM como alternativa na geração auxiliar em instalações elétricas de grande porte* (Doctoral dissertation, Universidade de São Paulo).

A produção científica brasileira tem tido um papel importante para os estudos híbridos no país, e também de certa forma aquecendo o interesse do mercado. Exemplos desses estudos podem ser vistos na Tab. 2 onde se expõe sistemas híbridos experimentais e suas potências, adaptado de [29].

Tabela 2 - Sistemas Híbridos Experimentais, instituição e capacidade. Adaptado de Barbosa *et al.* [29].

Sistema Híbrido	Instituição	Capacidade
FV-E do Laboratório de Energia Solar	UFRGS (Rio Grande do Sul)	420Wp (FV) e 400W (E)
FV-E do Centro Brasileiro de Energia Eólica	UFPE (Pernambuco)	360Wp (FV) e 1,5kW (E)
FV-E do Núcleo de Energias Alternativas e Renováveis	UNESP (São Paulo)	300Wp (FV) e 400W (E)
FV-E do Laboratório de Dispositivos Térmicos e Especiais	UFRN (Rio Grande do Norte)	320Wp (FV) e 750W (E)
FV-E da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro	Parque de Energias (Rio de Janeiro)	3,6kWp (FV) e 5kW (E)
FV-D do Laboratório de Sistemas Fotovoltaicos (2 sistemas)	USP (São Paulo)	Monofásico: 1,1kWp (FV) e 5kVA (D) Trifásico: 3kWp (FV) e 60kVA (D)
FV-D do Grupo de Estudos e Desenvolvimento de Alternativas Energéticas	UFPA (Pará)	3,12kWp (FV) e 12kVA (D)

Legenda: (E) Eólico, (FV) Fotovoltaico, (D) Diesel-elétrica.

Ao considerar a imprecisão, seja ela jurídica ou política e social, a continuidade do contrato entre Brasil e Venezuela sobre o suprimento de energia à Roraima pode ser considerado incerto [30], e a partir dessa premissa foi realizado o Leilão de Geração para suprimento à Boa Vista e regiões conectadas, que foi objeto da Portaria 512/2018 do Ministério de Minas e Energia (MME). Dentre os projetos vencedores, totalizando 294MW de potência, pode-se citar algumas soluções híbridas que combinam biocombustíveis, solar fotovoltaico e baterias. Do total de nove empreendimentos vencedores, sete deles com geração renovável, dentre estes sete, dois localizados na área sul de Roraima utilizando a produção local de biocombustíveis líquidos, ambos com característica híbrida, um com utilização de biomassa e outro com a geração fotovoltaica [31].

Dos projetos pilotos brasileiros, atualmente pode-se destacar o complexo eólico Ventos de São Vicente 8 a 14 unido à usina solar fotovoltaica Sol do Piauí (68MW), construído pela empresa Votorantim com início da operação previsto para janeiro de 2023. Outros projetos também foram concretizados no âmbito de Pesquisa e Desenvolvimento da ANEEL[32], sendo Usinas Hidrelétricas (UHE), Usinas fotovoltaicas (UFV), Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCH) e Usinas Eólicas (EOL):

- UHE Sobradinho + UFV;
- UHE Porto Primavera 1 + UFV;
- UHE Aimorés + UFV;
- UHE Itumbiara + UFV;
- PCH Santa Marta + UFV;
- EOL Santo Inácio + UFV Flor de Mandacaru;
- Fernando de Noronha; 1992: UTE-diesel + EOL; um raio destruiu a única turbina eólica em 2009; restaurado no âmbito do projeto de *Smart Grid*.

A maturação quanto ao debate de usinas híbridas brasileiras está posta, com projetos isolados operando, sistemas para pesquisa e desenvolvimento e um grande potencial a ser explorado. Nesse sentido, é importante destacar a matriz elétrica brasileira, com as fontes renováveis ocupando cerca de 85%. Com aproximadamente 60% correspondente à fonte hidráulica, 8% à biomassa, 11% à eólica, 2% à solar centralizada e 5% à geração distribuída (GD), majoritariamente proveniente de sistemas fotovoltaicos [33]. De modo geral, de acordo com o Sistema de Informações de Geração da ANEEL (SIGA) [34], com dados obtidos em março de 2022, já totalizam 13.482 empreendimentos em operação, 359 em construção e 1.194 empreendimentos com a construção não iniciada, pode-se observar um resumo exposto na Tab. 3, onde:

- CGH: Central Geradora Hidrelétrica;
- CGU: Central Geradora Undi-elétrica (Usina de ondas);
- EOL: Usina Eólica;
- PCH: Pequena Central Hidrelétrica;
- UFV: Usina Fotovoltaica;
- UHE: Usina Hidrelétrica;
- UTE: Usina Termelétrica;
- UTN: Usina Termonuclear.

Tabela 3 - Usinas no Brasil em operação, em construção e com construção não iniciada, por fonte de produção de energia. Adaptado de ANEEL [34].

Fonte	Em operação		Em construção		Construção não iniciada	
	Potência Outorgada (kW)	Parte do total (%)	Potência Outorgada (kW)	Parte do total (%)	Potência Outorgada (kW)	Parte do total (%)
CGH	848.576,92	0,46%	17.436,00	0,11%	2.000,00	0,00%
CGU	50	0,00%	0	0,00%	0	0,00%
EOL	21.602.343,86	11,72%	5.880.350,00	37,05%	7.671.210,00	16,19%
PCH	5.612.109,57	3,04%	403.502,10	2,54%	1.198.286,65	2,53%
UFV	4.794.309,81	2,60%	3.798.459,60	23,93%	33.504.216,00	70,72%
UHE	103.001.028,00	55,87%	141.900,00	0,89%	311.998,00	0,66%
UTE	46.502.051,29	25,22%	4.280.536,50	26,97%	4.690.200,00	9,90%
UTN	1.990.000,00	1,08%	1.350.000,00	8,51%	0	0,00%
TOTAL	184.350.469,45	100,00%	15.872.184,20	100,00%	47.377.910,65	100,00%

A partir da situação atual e possibilidades de produção, trazendo para a hibridização, o potencial brasileiro pode vir a ser exemplo a outros países, principalmente se for combinado energias renováveis, considerando suas características sazonais e periódicas, resultando além de uma diminuição em impacto no aquecimento global, mas em uma maior eficiência da rede. Um exemplo disso é mostrado na Fig. 5, onde é ressaltada a possibilidade de associação entre eólicas e solares, sendo que tais fontes coincidem sua existência massiva na região nordeste. Nesse sentido, a Resolução Normativa (REN) 954, publicada em 30 de novembro de 2021 vem com o objetivo de inserir definições e padronizações que podem mudar o cenário energético brasileiro.

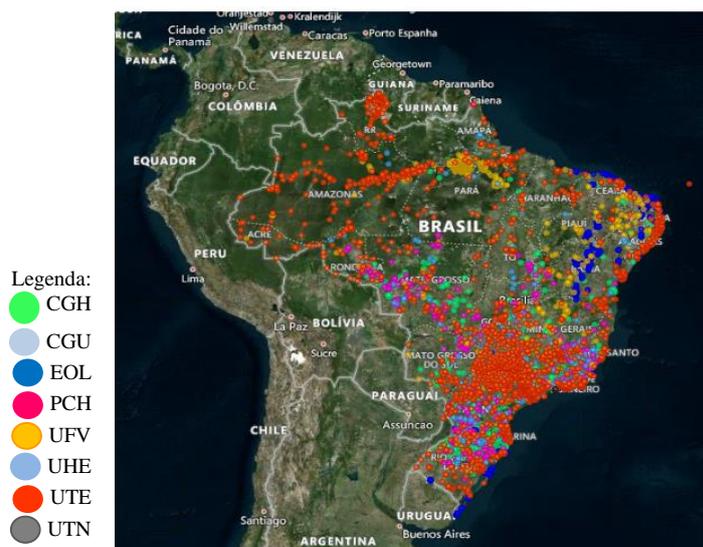


Figura 5 - Usinas no Brasil por fonte de produção de energia. Fonte: ANEEL [34].

3. RESOLUÇÃO NORMATIVA 954/2021

A REN 954, de 30 de novembro de 2021 [35], disposta em 24 artigos altera as RENs dispostas na Tab. 4, com o propósito de estabelecer tratamento regulatório para implantação de UGHs e Associadas no Brasil. No âmbito da instituição de normas, esse tema recentemente foi exposto na Agenda Regulatória de 2021-2022 [36] da agência reguladora trazendo pontos entendidos como essenciais para médio prazo brasileiro.

Tabela 4. Resoluções Normativas alteradas pela REN 954/2021 [35] e seus objetivos.

Resolução Normativa	Objetivo
Nº 77, de 18 de agosto de 2004 [37]	Estabelece os procedimentos vinculados à redução das tarifas de uso dos sistemas elétricos de transmissão e de distribuição, para empreendimentos hidrelétricos e aqueles com base em fonte solar, eólica, biomassa ou cogeração qualificada.
Nº 247, de 21 de dezembro de 2006 [38]	Estabelece as condições para a comercialização de energia elétrica, oriunda de empreendimentos de geração que utilizem fontes primárias incentivadas, com unidade ou conjunto de unidades consumidoras cuja carga seja maior ou igual a 500 kW e dá outras providências.
Nº 559, de 27 de junho de 2013 [39]	Estabelece o procedimento de cálculo das Tarifas de Uso do Sistema de Transmissão.
Nº 583, de 22 de outubro de 2013 [40]	Estabelece os procedimentos e condições para obtenção e manutenção da situação operacional e definição de potência instalada e líquida de empreendimento de geração de energia elétrica.
Nº 666, de 23 de junho de 2015 [41]	Regulamenta a contratação do uso do sistema de transmissão em caráter permanente, flexível, temporário e de reserva de capacidade, as formas de estabelecimento dos encargos correspondentes e dá outras providências.
Nº 876, de 10 de março de 2020 [42]	Estabelece os requisitos e procedimentos necessários à obtenção de outorga de autorização para exploração e à alteração da capacidade instalada de centrais geradoras eólicas, fotovoltaicas, termelétricas, híbridas e outras fontes alternativas, bem como para centrais geradoras associadas que contemplem essas tecnologias de geração, e à comunicação de implantação de centrais geradoras com capacidade instalada reduzida. (Redação dada pela REN 954 da ANEEL, de 30.11.2021 [35])

Considerando tais modificações, na Tab. 5 é possível ver um resumo das modificações feitas pela REN 954/2020 nas diversas outras Resoluções Normativas como mostrado na Tab. 4, para isso, destaca-se que:

- CCEE: Câmara de Comercialização de Energia Elétrica;
- CUST: Contrato de Uso do Sistema de Transmissão, celebrados entre o ONS, as concessionárias de transmissão representadas pelo ONS e os usuários da Rede Básica;
- DRO: Despacho de Requerimento de Outorga, documento que, apesar de não ser obrigatório para o pedido de outorga de autorização, tem como finalidade, dentre outras, facilitar a obtenção de eventuais pedidos de informação de acesso pela concessionária de transmissão de energia elétrica ou pelo ONS, e facilitar a obtenção de licenças e/ou autorizações dos órgãos responsáveis pelo licenciamento ambiental ou de outros órgãos públicos federais, estaduais, municipais ou do Distrito Federal;
- Mecanismo de Realocação de Energia (MRE): mecanismo financeiro de compartilhamento dos riscos hidrológicos associados à otimização eletroenergética do SIN;
- MUST: Montante de Uso do Sistema de Transmissão, que nada mais é do que a demanda que deve ser contratada, para um espaço de 3 anos, onde cada distribuidora deve suprir o seu mercado após o estudo de previsão de carga;
- MUSTg: Parcela do MUST contratado declarada para cada central geradora integrante do conjunto associado;
- ONS: Operador Nacional do Sistema Elétrico;
- TUST: Tarifa de Uso do Sistema de Transmissão, definida pela ANEEL [39].

Das mudanças em determinadas RENs, já pôde-se perceber que a REN 954/2021 [35] não define níveis de complementariedade entre as fontes, nem mesmo coloca restrições quanto aos tipos de tecnologias que podem compor UGHs e Associadas, também flexibiliza o prazo de implantação das UGHs, onde pode ser distinto contemplando os marcos específicos de cada tecnologia de produção de energia.

Tabela 5. Artigos, modificações em outras Resoluções Normativas feitas pela REN 954/2020 [35].

Artigos da REN 954/2021	Resolução modificada	Modificação	Do que se trata
1°	REN n° 876/2020 [42]	Altera a ementa	Adiciona as fontes híbridas e associadas em sua ementa;
2°	REN n° 876/2020 [42]	Inclui 3 incisos no Art° 1°	Define sobre UGHs ou associadas compostas por tecnologia hidráulica participantes do MRE;
3°	REN n° 876/2020 [42]	Inclui incisos V e VI no art. 3°	Define UGH e associadas;
4°	REN n° 876/2020 [42]	Altera o caput do art. 4°	Inserir UGH e outras fontes alternativas sobre o registro do requerimento de outorga de autorização de exploração no mesmo limite superior de 5.000 kW, definindo anexos necessários;
5°	REN n° 876/2020 [42]	Altera o caput e os §§4°, 5° e 6° do art. 6°	Define sobre DRO, inserindo as UGHs e substituindo o termo "EOL" por "usina que contemple a tecnologia de geração eólica";
6°	REN n° 876/2020 [42]	Alterar o caput e incluir os §§ 3° e 4° no art. 11°	Inserir UGH e outras fontes alternativas sobre a outorga de autorização de exploração, definindo anexos necessários, potências das fontes considerada para outorga de UGH devendo ser individualizada e sobre a associação de centrais geradoras onde pelo menos uma não deve ter CUST assinado previamente à associação;
7°	REN n° 876/2020 [42]	Alterar o caput do art. 13°	Inserir UGH e centrais que contemple tecnologia de geração eólica sobre a garantia de fiel cumprimento para outorga de autorização com os mesmos de 5% do investimento do empreendimento;
8°	REN n° 876/2020 [42]	Inclui o §2° no art. 14°	Define sobre ampliação dos empreendimentos de outorga nos termos da REN 875/2020 [43], incluindo as UGHs e associadas;
9°	REN n° 876/202 [42]	Inclui o §4° no art. 17°	Discorre sobre prazo de implantação de UGH que pode ser distinto, contemplando marcos específicos de cada tecnologia de geração, quando cabível;
10°	REN n° 583/2013 [40]	Incluir o inciso XVI no art. 2°	Define sobre Faixa de Potência das UGHs e associadas;
11°	REN n° 583/2013 [40]	Altera o § 3° do art. 5°	Substitui termos "fonte primária de usinas hidrelétricas" para fonte "primária hidrelétrica" no âmbito do mínimo e variações admitidas de produção de energia à plena carga das unidades geradoras despachadas centralizadamente quanto a liberação para início de operação comercial que trata o art. 5° da REN 583/2014 [40];
12°	REN n° 77/2004 [37]	Inclui os arts. 3°-B e 3°-C	Define as TUST para associadas e UGHs sem e com individualização de medições, tarifa de ultrapassagem, desconto sobre às TUST, quantidade de energia incentivada passível de comercialização para fontes com e sem garantia física e sobre a agente responsável pela aferição da energia gerada de cada fonte (CCEE) e sua proporcionalidade (ONS);
13°	REN n° 247/2006 [38]	Inclui os §§ 5° e 6° no art. 1°	Obrigatoriedade da medição individualizada de UGH que possua uma ou mais tecnologias de geração não enquadradas no §5° do art. 26 da Lei n° 9.427/1996 [44]; Comercialização como Consumidor Especial das UGHs e Associadas da parcela de fonte de energia que atenda os critérios dispostos §5° do art. 26 da Lei n° 9.427/1996 [44];
14°	REN n° 666/2015 [41]	Inclui o art. 1°-A	Inserir na REN as definições de UGH, centrais geradoras associadas, faixa de potência MUSTg e tecnologia de geração;
15°	REN n° 666/2015 [41]	Altera o art. 5°	Define que para cada Tecnologia de Geração de centrais, inclusive por autoprodutores independentes ou autoprodutores, nos CUST celebrados quando a geração for maior que a carga, devem ser colocados separadamente o MUST, a potência instalada e carga própria;
16°	REN n° 666/2015 [41]	Inclui os §§ 1°-A, 2°-A,	Define MUST para as UGHs e associadas, seu limite de faixa de potência, sendo subtraído as cargas próprias de cada tecnologia de geração, tendo mínimo como igual à soma dos MUST contratados das

		8º, 9º, 10 e 11 no art. 5º	centrais geradoras com CUST vigentes no momento da associação ou hibridização. Além disso, define para fins de cálculo tarifário, as parcelas do MUSTg referentes a cada central de geração e o mínimo do MUST já contratado sendo obrigatório para associação de unidades geradoras. Também define representante legal único para CNPJs distintos, associação de centrais onde uma ou mais já possuem CUST vigente, mudança na forma de associação que deverá ser precedida de Parecer de Acesso e não poderá implicar em redução do MUST contratado, devendo o CUST ser encerrado, sem ônus, e novos CUST serem firmados;
17º	REN n° 666/2015 [41]	Inclui o art. 5º-A	Define o aumento a partir do segundo ano de contratação, mediante Parecer de Acesso, os MUST de contratos em caráter permanente para UGHS ou associadas, também limita a solicitação de um aumento de MUST para o ano civil em curso, com solicitação sendo precedida com prazo mínimo de 90 dias em relação ao aumento pretendido;
18º	REN n° 666/2015 [41]	Inclui o art. 5º-B	Define as condições para redução, em uma vez ao ano, dos MUST de contratos em caráter permanente de UGHs ou Associadas e os encargos devidos à redução de forma onerosa do MUST contratado;
19º	REN n° 559 [39]	Inclui o art. 6º-A	Define o cálculo da TUST para UGHs e Associadas, sendo único para o conjunto associado e estabelecido nas apurações mensais de serviços e encargos pelo ONS após celebração do respectivo CUST;
20º	-	-	Define as condições para associação entre centrais geradoras cujos CUST tenham sido assinados anterior a publicação da REN 954/2021 [35];
21º	-	-	Define prazo (120 dias) para o ONS para encaminhar uma proposta de alteração dos Procedimentos de Rede, devendo ele contemplar os mecanismos de corte de geração para impedir sobrecarga na rede provocada pelas UGHS e associadas;
22º	-	-	Define prazo para o CCEE (120 dias) para encaminhar uma proposta de alteração nas Regras e Procedimentos de Comercialização que contemple o disposto da REN 954/2021 [35];
23º	-	-	Define realização da Avaliação de Resultado Regulatório no prazo de 6 (seis) anos contatos a partir da data de publicação da REN 954/2021 [35];
24º	-	-	Resolução entrou em vigor em 03 de janeiro de 2022;

Além disso, pode-se perceber nos primeiros nove artigos, há mudança na resolução REN 876/2020 [42], onde se define mais especificamente sobre a associação com usinas hidrelétricas participantes do MRE, onde discorre sobre as obrigações das Centrais Geradoras Híbridas ou Associadas, que:

- Deverão ter medições distintas por tecnologia de geração;
- A energia proveniente das demais tecnologias não poderão ser destinada ao MRE.

A garantia física de tecnologia não participante do MRE não poderá ser considerada para fins do MRE. Dentre as demais principais mudanças, mostradas também na Tab. 5, têm-se na Tab. 6 um resumo de algumas das principais definições da REN 954/2021 [35], e além delas, pontos importantes como:

- Associação com centrais geradoras existentes: como critério para associação, pelo menos uma das centrais geradoras não deve ter o CUST assinado previamente à associação;
- Definição de Faixa de Potência: faixa de valores de potência compreendida entre a soma das potências elétricas ativas nominais da tecnologia de geração de maior participação das UGHs ou Associadas, e a soma das potências elétricas ativas nominais de todas as tecnologias de geração.

Tabela 6. Definições do art 3º da REN 954/2021 [35].

#	Unidades Geradoras Híbridas	Centrais geradoras associadas
Característica fundamental	Combinação de diferentes tecnologias na produção de energia	Compartilhamento físico e contratual da mesma infraestrutura de conexão e uso dos sistemas de transmissão
Outorga	Única	Duas ou mais
Instalação	Única	Duas ou mais
Medição independente	Opcional	Obrigatório

A partir desta definição faixa de potência, já pelo no art. 16 da REN 954/2020 [35], há a definição em relação ao MUST caso das UGHs e as Associadas, que deve:

- ser único e é dado pelo valor declarado pelo usuário, que deverá estar dentro dos limites estabelecidos pela Faixa de Potência definida em seu ato de outorga, subtraídas as parcelas correspondentes às cargas próprias de cada Tecnologia de Geração;
- ser no mínimo, igual à soma dos MUST contratados das centrais geradoras com CUST vigentes no momento da associação ou da hibridização;
- para fins de cálculo tarifário, as centrais geradoras associadas devem declarar no CUST as parcelas do MUSTg referentes a cada central de geração, de modo que o somatório dessas parcelas seja igual ao MUST contratado pela associação, sendo que a parcela referente à central de geração existente antes da associação deve ser no mínimo o MUST já contratado;
- quanto a mudança na forma de associação das Centrais Geradoras, deverá ser precedida de Parecer de Acesso e não poderá implicar em redução do MUST contratado pela associação original, devendo o CUST vigente da associação ser encerrado, sem ônus, e os novos CUST serem firmados de forma a corresponder às novas características da associação;
- os contratados em caráter permanente dessas usinas, poderão ser aumentados a partir do segundo ano de contratação, mediante Parecer de Acesso, limitado a um aumento de MUST para o ano civil em curso. Quando constatado sobre a redução de MUST, poderão ser reduzidos uma vez ao ano, sob as seguintes condições:
 - I - em até 5% (cinco por cento) ao ano, de forma não onerosa, tendo como base o montante previamente contratado; e
 - II - em valores superiores a 5% (cinco por cento) ao ano, de forma onerosa, tendo como base o montante previamente contratado.

Outro ponto bem relevante a ser trazido na REN 954/2021 [35] discorre sobre a aplicação dos descontos da TUST junto aos consumidores de fonte incentivada nos termos do art. 26 da Lei nº 9.427/96 [44] onde para UGHs e associadas, resumidamente trazido na Tab. 7:

- Com medição individualizada, o percentual de desconto deverá guardar tal proporcionalidade com a energia gerada por cada fonte, observando os limites de ultrapassagem de potência injetada por cada tecnologia previstas nas Regras de Comercialização;
- Sem medição individualizada, os descontos serão aplicados como base no menor percentual de desconto correspondente às fontes híbridas, sendo que, caso uma das fontes não seja elegível a desconto, o percentual aplicado ao desconto será zero;
- Fica vedado a comercialização da energia produzida junto a consumidor especial em casos em que as UGHs não possuam medição individualizada.

Tabela 7. Definições do art. 12º da REN 954/2021 [35].

UGHs	Desconto na TUST	Exemplo
Sem medição independente	O menor entre as tecnologias de geração	UTE a gás natural + UFV: zero
		EOL+UFV: 50%*
Com medição independente	Proporcional à energia gerada por tecnologia de geração	UTE a gás natural (50% da energia) + UFV (50% da energia): 25%
		EOL (50% da energia) + UFV (50% da energia): 50%*

*Vide limites da Lei nº 9.427/1996 [44].

No ao artigo 13º, é colocado o caso em que as UGHs deverão possuir medição individualizada para fazer jus à comercialização junto ao Consumidor Especial, quando possua uma ou mais tecnologias de geração não enquadradas no §5º do art. 26 Lei nº 9.427/1996 [44]. Considerando a individualização da medição em UGHs ou associadas, será permitida a comercialização com Consumidor Especial da parcela de energia correspondente às tecnologias que estejam na Lei citada.

Quanto ao caso de não haver garantia física publicada em ato específico para alguma tecnologia ou para toda Central UGH ou Associada, a quantidade de energia incentivada passível de comercialização será conforme o tratamento estabelecido pelas Regras de Comercialização. Fica definido aqui também sobre a aferição da energia gerada por cada fonte mensalmente e a proporcionalidade que será realizada pela CCEE e os percentuais de desconto calculados serão encaminhados ao ONS para o cálculo do Encargo de Uso do Sistema de Transmissão - EUST.

Avançando para o art. 19º onde estabelece o procedimento de cálculo da TUST para as centrais geradoras associadas, sendo ela única para o conjunto associado e estabelecida nas apurações mensais de serviços e encargos de transmissão pelo ONS após a celebração do respectivo CUST. Fica definida como uma divisão entre o somatório da multiplicação dos TUST com o MUST de “n” centrais geradoras, dividido pelo somatório dos MUST de “n” centrais geradoras, considerando “i” centrais geradoras participantes da associação, sendo expressa na Eq. 1:

$$TUST_{associação} = \frac{\sum_{i=1}^n TUST_{gi} \times MUST_{gi}}{\sum_{i=1}^n MUST_{gi}} \quad (1)$$

Para a adaptação transitória, no artigo 20º, relata que será admitida a associação entre centrais com CUST assinados antes da publicação da REN nº 954/2021 [35], com algumas restrições, são elas:

- (i) antes da associação, pelo menos um dos CUST das centrais geradoras tenha o início de execução contratado para após 30 de junho de 2023;
- (ii) a assinatura do CUST resultante da associação ocorra até 31 de março de 2023;
- (iii) não haja obra de transmissão planejada, licitada ou autorizada para aumento do escoamento da geração no ponto de conexão.

De forma geral, até a mudança de termos, como mostrada na Tab.5, onde troca-se o termo “EOL” para “usinas que contemplem a tecnologia de geração eólica”, já padroniza procedimentos regulatórios tanto das usinas eólicas quanto as associadas que as contemplem. Pode-se também perceber além das definições, os tratamentos diferenciados que devem ser tomados quanto as UGHs e associadas, tendo a possibilidade de associação de usinas existentes no horizonte do setor elétrico, assim como a forma de tratar a TUST relacionando todas as fontes do sistema existente através de expressão mostrada na Eq. 1. Como colocado na Tab. 5, tanto o ONS quanto a CCEE deverão enviar propostas de alteração dos respectivos procedimentos de rede e comercialização, no prazo de 120 dias contados da data de publicação da norma [35], que será objeto de Avaliação de Resultado Regulatório no prazo de seis (6) anos a partir da publicação e vigor dado como 03 de janeiro de 2022.

3.1 MUDANÇAS TRAZIDAS PELA RESOLUÇÃO NORMATIVA 954/2021

Com o tema de usinas híbridas e associadas, nos últimos anos a EPE tem lançado notas técnicas intensificando o debate no setor, pode-se destacar quatro delas: iniciando em 2017, com uma metodologia para cálculo de cortes de produção concomitante em usinas eólicas-fotovoltaicas [45], a segunda, com discussões conceituais, apontando tipologias de combinação, além de aspectos comerciais e regulatórios [13], a terceira, com experiências internacionais e tópicos ligados ao planejamento [16], sendo que logo antes do lançamento desse último estudo, foi realizado um Workshop com os agentes do setor para debate do tema, e a quarta já em 2020 com o objetivo de apresentar considerações iniciais para o cálculo de Garantia Física de Energia de usinas associadas eólicas-fotovoltaicas [46]. Nestes debates se colocou a necessidade da regulação de usinas híbridas e associadas, a fim de garantir segurança de mercado e uma mudança de panorama no setor elétrico brasileiro. Mais voltado ao tema regulatório, conforme EPE [13], foi resumido na Tab. 8 algumas mudanças tidas como necessárias e o que foi trazido pela REN 954/2020 [35].

Tabela 8. Mudanças ditas como necessárias por EPE [13] e definições da REN 954/2021 [35].

Mudanças ditas como necessárias	REN 954/2020 [35]
Permitir a contratação de MUST/MUSD inferior à capacidade total instalada	Definiu-se conceito de Faixa de Potência para âmbito da MUST;
Outorga	UGHs com outorga única e centrais geradoras associadas com duas ou mais;
Garantia Física	A garantia física de tecnologia não participante do MRE não poderá ser considerada para fins do MRE; A quantidade de energia incentivada passível de comercialização será a garantia física sazonalizada para fins de lastro de cada tecnologia autorizada a ter desconto, observada a aferição dos limites de ultrapassagem de potência injetada por cada tecnologia prevista nas Regras de Comercialização; No caso de não haver garantia física publicada em ato específico para alguma tecnologia ou para toda UGH ou Associada, a quantidade de energia incentivada passível de comercialização será conforme o tratamento estabelecido pelas Regras de Comercialização.
Corte de Energia (curtailment)	Definido que o ONS deverá encaminhar à ANEEL proposta de alteração dos Procedimentos de Rede, devendo contemplar os mecanismos de corte de geração para impedir sobrecarga na rede;
Associação de centrais geradoras	Pelo menos uma das centrais geradoras não deve ter o CUST assinado previamente à associação;
Desconto na TUST	Definidos, mostrados na Tab. 7.

Ao analisar a Tab. 8, pode-se perceber a definição de Faixa de Potência entendida apenas no âmbito da MUST, ou seja, não definindo sobre o montante de distribuição, como sugerido por EPE [13], e assim favorecendo apenas as UGHs e associadas que utilizem o sistema de transmissão. Contudo, ao definir a proporcionalidade para o desconto da TUST, assim como para a garantia física de empreendimentos que possuem processos de produção de energia através de fonte eólica, a REN 954/2021 [35], traz uma padronização para a geração centralizada, e por consequência uma maior segurança no mercado das usinas de grande porte. Além da definição de outorga de autorização para UGHs e associadas, a associação de centrais geradoras já existentes limitadas a não existência de CUST de pelo menos uma, já viabiliza um novo mercado a ser expandido, tanto na construção de novas UGHs e Associadas como na associação das já existentes.

Porém, as perdas por *curtailment* (perda por excesso de geração) em função da injeção limitada na rede dada pelo montante de uso da rede contratado ainda espera definição do ONS. Neste caso, segundo EPE [13], é exposto a necessidade de tais perdas serem considerados intrínsecos a usinas do tipo associadas, devendo ser percebida pelo gerador e estimada desde a fase de projeto, e no caso de tal corte de energia por essa falta de capacidade de escoamento, ainda se torna necessário definir qual fonte seria cortada no caso de contratos separados e considerando as diferenças de contratos.

Além disso, apesar de definir a garantia de fiel cumprimento para empreendimentos que possuem produção de energia a partir de fonte eólica, ainda se torna necessário aprofundamento ao cálculo de garantia física para outros tipos de hibridizações ou associações, assim como da contabilização da energia produzida e sua precificação. Atualmente a Portaria MME no 101, de 22 de março de 2016 [47] formula sobre a garantia física das usinas eólicas e fotovoltaicas, sendo que para ambas, é estimado a produção anual de energia no longo prazo com desconto sobre as indisponibilidades (programada e forçada), consumo interno e das perdas elétricas. Nessa definição, a principal diferença se dá sobre a probabilidade de ocorrência da energia anual média, onde para as eólicas é considerado valor igual ou maior de 90% (P90) e para as fotovoltaicas de 50% (P50). Nesse sentido, conforme EPE [46], é apresentado propostas de cálculo para a garantia física de energia de usina associada eólico-fotovoltaica, considerando tal garantia seria individualizada por fonte, tendo duas equações distintas, considerando caso a energia eólica seja objeto de corte de excedente de energia e outra considerando a fotovoltaica como sendo o mesmo objeto. Através de tal estudo, evidenciou-se a dificuldade de estimar uma única garantia física para uma geração combinada.

Em nota técnica da ANEEL [48] no que se refere a garantia física, é colocado a sugestão do Banco Nacional do Desenvolvimento (BNDES) que estipula a mudança de critério de “P50” para “P90” para a fonte fotovoltaica, elevando a probabilidade para 90% da usina gerar o volume mínimo de energia firme (garantia física) declarado. Assim, a garantia física GF será menor e, dessa forma, definida de forma mais conservadora. De forma geral, este ponto ainda está em aberto, segundo a mesma nota [48], enquanto alguns agentes do setor defendem que a garantia física de uma usina híbrida seja a soma individuais de cada GF, outros sugerem que seja definida via simulação sobre a contribuição de cada fonte.

Pode-se assim perceber que apesar de trazer as definições de UGHs e Associadas, desconto aplicável na TUST, associação de centrais geradoras e outorga de exploração, ainda fica em aberto pontos como corte de energia (*curtailment*), garantia física e participação dessas usinas em leilões de energia. Este último ponto, considerando que atualmente têm-se um ambiente em que as contratações no Ambiente de Contratação Regulada são predominantemente por tecnologia/fonte, especificados as condições e preços das fontes, será necessária adaptação de tais editais que possam vir a permitir a participação das UGHs e de associadas.

4. CENÁRIOS POSSÍVEIS PARA HIBRIDIZAÇÃO

De maneira geral, estudos sobre hibridização de fontes vem ganhando espaço no setor. Algumas possíveis combinações de fontes e tecnologias foram descritas pela EPE [13], sendo elas:

- eólica com fotovoltaica, ressaltando a complementaridade das fontes em algumas regiões onde contam menor incidência de ventos diurnos, com diversos estudos analisando a viabilidade econômica [49], [9] e [50];
- hidráulica com fotovoltaica, com projetos pilotos, já em 2018, nos estados do Amazonas, São Paulo e Bahia [13];
- hidrotérmica (termossolar) com outro combustível (biomassa), com estudos analisando a biomassa como combustível complementar [51];
- biomassa com carvão natural, onde aumentaria o período de despacho dessas usinas e a eficiência global do ciclo térmico [52]; carvão com biomassa (coqueima), com potencial de redução de emissões de CO₂.

Ainda no âmbito de tais associações, há estudos que buscam fazer uma análise econômica sobre a hibridização de fontes de produção de energia distintas, estes estão colocados de forma resumida na Tab. 9. Através de alguns exemplos mostrados na Tab. 9, é observado as dificuldades, vantagens e viabilidades econômicas de diferentes configurações de usinas com mais de uma fonte de produção de energia. Vale ainda ressaltar, que como mostrado por EPE [45], o efeito econômico e de complementaridade de fontes depende de diversas variáveis, metodologia consistente e deve ser avaliado caso a caso. Contudo, tendo como base que os estudos mais difundidos são da complementação de usinas fotovoltaicas com eólicas, outro estudo de Maia [53] indica que ao analisar o Valor Presente Líquido (VPL) de associação entre tais fontes de produção de energia, ele se mostrou superior se considerado os empreendimentos desenvolvidos separadamente.

Percebe-se através da Tab. 9 a adaptação da produção de energia fotovoltaica com diversas outras fontes. Essa vantagem tende a ser explorada, visto que, em caso de usinas já existentes que demandam de construções que disponibilizam de área coberta, como no caso de usinas térmicas, a sua pré-estrutura está instalada possuindo área disponível de telhado para instalação de módulos fotovoltaicos. Essa adaptação se dá também sobre as usinas de

tecnologia hídrica, onde contém espaço físico possível de implementação de módulos flutuantes. Tal facilidade de adaptação da fonte fotovoltaica pode ser dita como uma das vantagens e também como oportunidade de associação ou hibridização de centrais existentes, além da redução de impacto ambiental, flexibilidade em adaptação com demanda e a utilização do mesmo espaço físico. Para as desvantagens ou dificuldades de tal mercado, além do custo elevado de implementação, os equipamentos e instalação, principalmente para as híbridas por possuírem produção e medição de energia única, tendem a necessitar maior atenção ao setor, com desenvolvimentos de inversores híbridos e sua disseminação no mercado.

Tabela 9. Estudos de Casos de Sistemas Híbridos, vantagens, desvantagens e possíveis soluções.

Sistema Híbrido	Vantagens	Desvantagens	Possíveis soluções
Diesel + Recurso Renovável (eólico e fotovoltaico) implementados na Região Amazônica [54]	<p>Custos operacionais reduzidos com contribuição de geração renovável;</p> <p>Redução de impactos ambientais;</p> <p>Aproveitamento de recursos energéticos disponíveis localmente;</p> <p>Flexibilidade, adaptável à demanda de energia;</p>	<p>Redução não compensaria significativamente custos operacionais dos sistemas híbridos em si;</p> <p>Investimento inicial elevado;</p> <p>Distorções harmônicas de corrente;</p> <p>Desbalanceamento de potência nas fases;</p> <p>Afundamentos e queda de tensão;</p> <p>Grande variação de frequência quando o subsistema diesel-elétrico supre a demanda;</p>	<p>Aplicação do subsídio da Conta de Consumo de Combustível (CCC);</p> <p>Controle do aumento da carga instalada;</p> <p>Redistribuição das unidades consumidoras pelas fases da rede de distribuição;</p> <p>Instalação de banco de capacitores para elevação de tensão;</p> <p>Dispositivo de controle de tensão/frequência nos subsistemas diesel-elétricos;</p>
Transformação de usina eólica em eólica – fotovoltaica na região de Araripirina (PE) com acréscimo de 20% de potência instalada em energia solar fotovoltaica em um período de 20 anos [50]	<p>Taxa Interna de Retorno de 11,002% se mostrando viável;</p> <p>Complementariedade de performance de produção de energia;</p>	<p><i>Curtailment</i> (necessidade de limitação de rede devido à dificuldade de escoamento de energia);</p>	<p>Adaptação para definição de corte de energia, simulações para determinar qual das fontes seria objeto de corte;</p>
Sistema Híbrido Biogás-Solar em propriedade rural [55]	<p>Retorno do investimento (<i>Payback</i>) estimado para 1,64 a 1,89 anos;</p> <p>O custo de produção de eletricidade utilizando o biogás-solar foi de 0,077US\$/kWh, por outro lado, o valor da energia pago na concessionária foi de 0,12US\$/ kWh;</p> <p>Venda de créditos de carbono e a mitigação dos gases de efeito estufa;</p>	<p>Alto grau de complexidade na fase de dimensionamento e de análise financeira;</p>	<p>Uso de ferramentas computacionais para avaliar viabilidade econômica;</p>
Sistema Híbrido hidráulico-fotovoltaico na usina hidrelétrica de Irapé (MG) [56]	<p>O custo de implantação estimado foi 2,86R\$/Wp, em que a partir do modelo financeiro foi obtida uma TIR de 15,5% e um VPL positivo;</p> <p>O fator de capacidade da usina hidrelétrica foi de 13,79% para 21,98% com a integração da usina solar fotovoltaica;</p>	<p>Característica intermitente da produção de energia fotovoltaica em altas potências pode dificultar o controle de tensão da rede interligada gerando instabilidade;</p>	<p>Adequação quanto a armazenamento de energia na forma de reservatórios, assim garantindo um fluxo de energia mais contínuo para a rede;</p>

Apesar da maioria dos sistemas apresentados na Tab. 9 trabalharem de forma isolada ao SIN, são entendidas como tecnologias possíveis de serem conectadas ao sistema nacional. Nesse sentido, se faz de suma importância compreender os processos de implementação de sistemas de produção de energia com mais de uma fonte, como mostrado na Tab. 1 e a carga produção científica mostrada na Tab. 2, com isso se entende que apesar da REN 954/2011 [35] ser uma publicação recente, o debate sobre tais formas de obtenção de energia já amadurece no caso brasileiro nos últimos tempos. Com isso, entendendo que a avaliação econômica deve ser feita considerando caso a caso, percebe-se as vantagens e desvantagens tanto com as usinas já existentes quanto as que estão em fase de planejamento e percebe-se que o setor requer inovação para a garantia tanto de suprimento de energia quanto de segurança do mercado econômico nacional.

5. DISCUSSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

A REN 954/2021 [35] trouxe a definição tanto das UGHs, centrais associadas, e também de Faixa de Potência para uma melhor adequação dos montantes de uso do sistema de transmissão. Alguns pontos importantes na regulamentação dessas usinas ainda aguardam marcos regulatórios. Esse é o caso da garantia física, dos cortes de energia, e relação entre fontes despacháveis (fontes que podem ser acionadas a qualquer tempo para atender o consumo ou sua variação) e não-despacháveis associadas, assim como o montante de uso do sistema de distribuição, que como sinaliza EPE [13] a REN 506/2012 [57] que trata de tal tema deverá se ser revisada.

De modo geral, a norma traz segurança de mercado para a produção de energia de forma centralizada, definindo desconto na TUST, associação entre centrais existentes, assim como estabelecendo prazo para o ONS definir os processos de rede no que tange aos cortes de energia. Dito isso, considerando o crescimento da GD brasileira, é de suma importância a regulação para os montantes de distribuição, assim conferindo legalidade e podendo expandir mercados como os de armazenamento de energia no caso brasileiro.

Considerando o potencial brasileiro, assim como nossa matriz de fontes renováveis diversa, os cenários de associação entre fontes disponíveis tendem a crescer com a nova norma, ainda que de forma centralizada. Isso pode abrir um cenário de novos mercados, tanto na produção de inversores híbridos *on-grid* e *off-grid*, equipamentos quanto de novos profissionais no mercado capazes de fluir entre as diferentes formas de produção de energia. Indiretamente, através de aproveitamento de espaço físico, pode também ocorrer diminuição de impactos ambientais recorrentes a ocupações de áreas que podem servir para moradia, agricultura ou para a proteção ambiental e de povos tradicionais, assim como, com o aumento da utilização de fontes renováveis, a redução da produção de gases do efeito estufa.

Do ponto de vista do sistema elétrico, através das sinergias de construção e operação, há indícios de otimização da rede de transmissão, com uma produção de energia mais constante e assim afetando positivamente tanto na garantia de suprimento, qualidade da energia, quanto ao preço, já que usinas termelétricas, por exemplo, têm seu preço de acionamento significativamente mais caro que as demais fontes. Através desta otimização da rede de transmissão, o investimento para escoamento para a mesma quantidade de energia se torna menor, tornando esse mercado mais eficiente e competitivo além de trazer uma modernidade a rede, abrindo espaço para desenvolvimento de *smart cities* e *smart grids*. Também de forma indireta, essa norma [35] coloca o país num cenário onde novos investimentos a partir do mercado multinacional se torna mais seguro, visto que garantia de suprimento, preço favorável e qualidade de energia, desenvolvendo economicamente a nação através da geração de novos empregos.

Para estudos futuros recomenda-se a avaliação de garantia física de diferentes combinações de produção de energia e seus cortes de energia, considerando as associadas e híbridas. Além disso a adaptação em editais de leilões dessas tipologias, principalmente as UGHs por ter de apresentar preço único de energia e, com diversas possibilidades de associação essa precificação ter definições mais complexas. Da mesma forma, é necessário compreender como relacionar as fontes despacháveis e não-despacháveis em uma associação ou hibridização e também sobre a inserção dessas novas formas de produção de energia na geração distribuída, através de reavaliação do montante de uso do sistema de distribuição e entendimento do marco legal da microgeração e minigeração distribuída [58].

No que tange ao sistema tarifário brasileiro, as associações e hibridizações se tornam uma alternativa interessante tanto pela garantia de suprimento, quanto pela possível competitividade de preços de energia em leilões e no mercado livre de energia. Com a inserção de novas fontes de produção de energia, desenvolvimento de sistemas de armazenamento integrados, pode-se reduzir a dependência relativa a níveis de reservatórios de água, com isso, a diminuição de acionamento de usinas termelétricas, e conseqüentemente um balanço mais econômico no que tange a tarifa da energia, visto que a maior produção e dependência brasileira de suprimento vem de hidrelétricas, vide Tab 3.

Apesar de aumentar a complexidade na construção e operação do processo de produção de energia, as UGHs e associadas possuem um grande potencial no caso brasileiro, considerando as diversas possibilidades de associações, novas tecnologias sendo desenvolvidas, como o caso das Usinas de Ondas e células à combustão de hidrogênio, além da nova regulamentação de usinas eólicas *offshore* [59], podendo ascender a possibilidade de associação com fotovoltaico flutuante ou até mesmo com sistemas de produção de energia de ondas ou marés. Em suma, ao considerar tantas possibilidades de associação e hibridização, redução de impactos ambientais e flexibilidade de obtenção de energia de acordo com a demanda, a REN 954/2021 [35] vem com o intuito de institucionalizar um mercado que mundialmente já se entende como necessário e, apesar de ainda requerer pontos de atenção para regulamentações futuras, já mostra um salto a um futuro tecnológico que prioriza a estabilidade da energia e a redução de impactos ambientais, além de propriamente se tornar mais viável financeiramente e de reforçar mercado de crédito de carbono.

REFERÊNCIAS

- [1] EPE, 2021. Previsão de carga para o Planejamento Anual da Operação Energética 2021-2025. Rio de Janeiro: [s. n.]. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-305/topico-561/NT%20PLAN%202021-2025%20final.pdf>>. Acesso em: 17 abril 2022.
- [2] Neto, J. A., Queiroz, F. C. B. P., Queiroz, J. V., Lima, N. C., da Silva, C. L. (2020). Evolução e perspectivas do setor eólico no Brasil: análise dos principais estados produtores. *Revista em Agronegócio e Meio Ambiente*, 13(4), 1409-1432.
- [3] Needham, J. (1962). *Science and Civilisation in China: Physics and physical technology; pt. 1. Physics, with the collaboration of Wang Ling and the special co-operation of Kenneth Girdwood Robinson; pt. 2. Mechanical engineering; pt. 3. Civil engineering and nautics with the collaboration of Wang Ling and Lu Gwei-Djen* (Vol. 4). University Press.
- [4] Pan, A. C., 2022. Processo de Fabricação de Células Solares Bifaciais em Fornos de Aquecimento Rápido. Dissertação de Mestrado, PGETEMA, PUCRS, Porto Alegre.
- [5] Freitas, G. S., Dathein, R., 2013. As energias renováveis no Brasil: uma avaliação acerca das implicações para o desenvolvimento socioeconômico e ambiental. *Nexos Econômicos*, 7(1), 71-94.
- [6] EPE, 2021. Balanço Energético Nacional 2021: Ano base 2020. Empresa de Pesquisa Energética. – Rio de Janeiro: EPE. Disponível em <<https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-601/topico-596/BEN2021.pdf>>. Acesso em: 21 abril 2022.
- [7] Jurasz, J.; Canales, F. A.; Kies, A.; Guezgouz, M.; Beluco, A., 2020. A review on the complementarity of renewable energy sources: concept, metrics, application and future research directions. *Solar Energy*, 195, n. 1, pp. 703–724.
- [8] Badwal, S. P., Giddey, S. S., Munnings, C., Bhatt, A. I., Hollenkamp, A. F., 2014. Emerging electrochemical energy conversion and storage technologies. *Frontiers in chemistry*, 2, 79.
- [9] Carvalho, D. B., Guardia, E. C., Lima, J. W. M., 2019. Technical-economic analysis of the insertion of PV power into a wind-solar hybrid system. *Solar Energy*, 191, 530-539.
- [10] Eras-Almeida, A. A., & Egado-Aguilera, M. A., 2019. Hybrid renewable mini-grids on non-interconnected small islands: Review of case studies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 116, 109417.
- [11] Deshmukh, M. K., & Deshmukh, S. S., 2008. Modeling of hybrid renewable energy systems. *Renewable and sustainable energy reviews*, 12(1), 235-249.
- [12] Blechinger, P., Cader, C., Bertheau, P., Huyskens, H., Seguin, R., & Breyer, C., 2016. Global analysis of the techno-economic potential of renewable energy hybrid systems on small islands. *Energy Policy*, 98, 674-687.
- [13] EPE, 2018. Usinas Híbridas: Uma análise qualitativa de temas regulatórios e comerciais relevantes ao planejamento. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-232/topico-393/NT%20EPE-DEE-NT-011-2018-r0%20%28Usinas%20h%C3%ADbridas%29.pdf>>. Acesso em: 20 março 2022.
- [14] WINDEUROPE, 2019. *Renewable Hybrid Power plants. Exploring the benefits and market opportunities*. Disponível em: <<https://windeurope.org/wpcontent/uploads/files/policy/position-papers/WindEurope-renewablehybrid-power-plants-benefits-and-market-opportunities.pdf>>. Acesso em: 20 março 2022.
- [15] WINDEUROPE, 2019. Hybrid renewable power plants make a good business case but need clearer legislation to become more widespread. Disponível em: <<https://windeurope.org/newsroom/news/hybrid-renewable-power-plants-make-a-good-business-case/>>. Acesso em: 20 março 2022.
- [16] EPE, 2019. Usinas Híbridas: no Contexto do Planejamento Energético. Brasília: Empresa de Pesquisa Energética. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-386/EPE_DEE_NT_029_2019_r0_%20Usinas%20h%C3%ADbridas.pdf>. Acesso em: 20 março 2022.
- [17] ANEEL, 2020. Relatório de Análise de Impacto Regulatório N° 002/2020-SRG/SRT/SCG/ANEEL. Brasília.

- [18] MINNESOTA, 2022. Minnesota Public Utilities Commission. Disponível em: <<https://minnesotapuc.legistar.com/LegislationDetail.aspx?ID=2983987&GUID=1E9EE6B3-CEEC-44C6-8C83-37FA613AD548&Options=&Search>>. Acesso em: 16 abril 2022.
- [19] BERKELEY LAB, 2022. Online Hybrid and Energy Storage Projects. Disponível em: <<https://emp.lbl.gov/online-hybrid-and-energy-storage-projects>>. Acesso em: 30 março 2022.
- [20] Renewables, R., 2018. Global Status Report (Paris: REN21 Secretariat). *Paris Renewable Energy Policy Netw. 21st Century France*.
- [21] REN 21 - RENEWABLES NOW, 2020. Renewables 2020 - Global Status Report. Paris, França. Disponível em: <<https://abdn.pure.elsevier.com/en/publications/ren21-renewables-2017-global-status-report>>. Acesso em: 22 março 2022.
- [22] Andini, C., Cabral, R., Santos, J. E., 2019. The macroeconomic impact of renewable electricity power generation projects. *Renewable energy*, 131, 1047-1059.
- [23] ANEEL, 2021. Consideradas um salto de inovação, usinas híbridas são regulamentadas pela ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica, Brasil. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/sala-de-imprensa/-/asset_publisher/zXQREz8EVIZ6/content/id/23188886>. Acesso em 20 fev. 2022.
- [24] WWF – World Wide Found, 2021. Relatório planeta vivo, 2021. Geração de Energia em Fernando De Noronha: Alternativas para a Diminuição de Emissões de Co2 no Transporte e Eletricidade Brasil 2021. Disponível em: <https://wwfbr.awsassets.panda.org/downloads/geracao_de_energia_fernando_de_noronha_versao_web_1.pdf>. Acesso em 20 fev. 2022.
- [25] Cartaxo, E. F., de Martino Jannuzzi, G, 2000. Cartaxo, E. F., & de Martino Jannuzzi, G. Análise técnica e econômica de um sistema de distribuição de energia elétrica híbrido solar-diesel: um estudo de caso. *Potência (kW)*, 15(20), 25.
- [26] Trannin, M., 2016. Desafios e oportunidades para a geração de energia elétrica por fontes renováveis no Brasil: estudo de caso sobre a Usina híbrida de Tacaratu (PE). *Boletim de Conjuntura*,(4), 4-7.
- [27] EPE, 2022. Análise Socioambiental Das Fontes Energéticas Do PDE 2031, 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 15 abril 2022.
- [28] CANAL ENERGIA, 2021. União Faz a Força: Projetos Híbridos Crescem No Brasil. Disponível em: <<http://www.apine.com.br/site/archives/Noticias/25.06%20-%20Reportagem%20especial%20-%20Uni%C3%A3o%20faz%20a%20for%C3%A7a%20-%20projetos%20h%C3%ADbridos%20crescem%20no%20Brasil%20-%20CanalEnergia.pdf>>. Acesso em: 02 abril 2022.
- [29] Barbosa, C., Pinho, J., Galhardo, M., Pereira, E., 2016. Sistemas Híbridos de Energia: Aplicações e Estudos no Brasil. In *VI Congresso Brasileiro de Energia Solar-VI CBENS*. 98715755
- [30] BRASIL, 2018. Ministério de Minas e Energia/Gabinete do Ministro. Portaria nº 512, de 21 De dezembro de 2018. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, ISSN 1677-7042, n. 246, p. 130.
- [31] BRASIL, 2020. Ministério de Minas e Energia, Empresa de Pesquisa Energética Plano Decenal de Expansão de Energia 2029. Empresa de Pesquisa Energética. Brasília. Disponível em <<https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Documents/PDE%202029.pdf>>. Acesso em: 22 fev. 2022.
- [32] Canal Solar, 2021. Usinas híbridas são regulamentadas pela ANEEL. Disponível em: <<https://canalsolar.com.br/usinas-hibridas-sao-regulamentadas-pela-aneel/>>. Acesso em: 20 março 2022.
- [33] ANEEL, 2022. ANEEL reforça protagonismo do Brasil em fontes renováveis no Energyyear 2022. Disponível em: <<https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/noticias/2022/aneel-reforca-protagonismo-do-brasil-em-fontes-renovaveis-no-energyyear-2022>>. Acesso em: 21 março 2022.

- [34] ANEEL, 2022. Sistema de Informações de Geração da ANEEL (SIGA). Disponível em: <<https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiNjc4OGYyYjQtYWM2ZC00YjllWjIYmEtYzdkNTQ1MTc1NjM2IiwidCI6IjQwZDZmOWI4LWVjYTctNDZhMi05MmQ0LWVhNGU5YzAxNzBIMSIsImMiOiR9>>. Acesso em: 21 março 2022.
- [35] ANEEL, 2021. Resolução ANEEL nº 954 de 30 de novembro de 2021. Disponível em: <<https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2021954.html>>. Acesso em 14 fev. 2022.
- [36] ANEEL, 2020. Agenda Regulatória 2021-2022. Disponível em: <<https://antigo.aneel.gov.br/documents/660863/22733978/ATO+-+Anexo+I+segunda+revisa%CC%83o.pdf/74b41401-1abc-067e-4335-1b537da41f8d>>. Acesso em: 13 fev. 2022.
- [37] ANEEL, 2004. Resolução ANEEL nº 77 de 18 de agosto de 2004. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/bren2004077.pdf>>. Acesso em: 14 fev. 2022.
- [38] ANEEL, 2006. Resolução ANEEL nº 247, de 21 de dezembro de 2006. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2006247.pdf>>. Acesso em: 14 fev. 2022.
- [39] ANEEL, 2013. Resolução ANEEL nº 559, de 27 de junho de 2013. Estabelece o procedimento de cálculo das Tarifas de Uso do Sistema de Transmissão – TUST. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2013559.pdf>>. Acesso em: 14 fev. 2022.
- [40] ANEEL, 2013. Resolução ANEEL nº 583, de 22 de outubro de 2013. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2013583.pdf>>. Acesso em: 14 fev. 2022.
- [41] ANEEL, 2015. Resolução ANEEL nº 666, de 23 de junho de 2015. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2015666.pdf>>. Acesso em: 14 fev. 2022.
- [42] ANEEL, 2020. Resolução ANEEL nº 876, de 10 de março de 2020. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2020876.pdf>>. Acesso em: 14 fev. 2022.
- [43] ANEEL, 2020. Resolução ANEEL nº 875, de 10 de março de 2020. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2020875.pdf>>. Acesso em: 14 fev. 2022.
- [44] BRASIL, 1996. Lei nº 9.427, de 26 de dezembro de 1996. Institui Brasília, DF. Disponível em <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/19427cons.htm>. Acesso em: 23 abril 2022.
- [45] EPE, 2017. Avaliação da geração de usinas híbridas eólico-fotovoltaicas. Rio de Janeiro: [s. n.]. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-232/topico-214/Metodologia%20para%20avalia%C3%A7%C3%A3o%20de%20usinas%20h%C3%ADbridas%20e%C3%B3lico-fotovoltaicas.pdf>>. Acessado em: 14 abril 2022.
- [46] EPE, 2020. Usinas associadas eólico-fotovoltaicas: Considerações para cálculo de garantia física de energia. Brasília: Empresa de Pesquisa Energética. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-540/NT-EPE-DEE-084-2020_GF_usinas_associadas_r1.pdf>. Acessado em: 14 abril 2022.
- [47] BRASIL, 2016. Ministério de Minas e Energia. Consultoria Jurídica. Portaria nº 101, de 22 de março de 2016.
- [48] ANEEL, 2020. Relatório de Análise de Impacto Regulatório Nº 002/2020-SRG/SRT/SCG/ANEEL. Brasília, 2020.
- [49] Baracco, R. P., Lourenço, S., Levenhagen, R. S., Cassiano, D., 2015. *Análise técnica e financeira de usina híbrida eólica-fotovoltaica*, Dissertação de mestrado, Universidade Federal do ABC, Brasil.
- [50] Garcia, P. H. V., Fuzeti, G. F., Pereira, B. A., Catapan, M. F., Strobel, C. S., 2021. Estudo de Viabilidade Econômica para Conversão de Usina Eólica Onshore em Usina Híbrida Eólico-fotovoltaica. *Brazilian Journal of Development*, 7(1), 1080-1095.
- [51] Soria, R., Portugal-Pereira, J., Szklo, A., Milani, R., Schaeffer, R., 2015. Hybrid concentrated solar power (CSP)–biomass plants in a semiarid region: A strategy for CSP deployment in Brazil. *Energy Policy*, 86, 57-72.
- [52] Ribeiro, S. G., Ferrari, J. W., Schoubek, A. F., Bertinotti, C. R., 2017. Natural gas as a power booster fuel in sugarcane bagasse thermoelectric power plants. *Int Gas Res Conf Proc*. Vol. 1, pp. 498-507.

- [53] Maia, D. N., 2021. Avaliação Econômico-Financeira de Usinas Híbridas no Brasil. Tese de Doutorado, PUC-Rio.
- [54] Barbosa, C. F. D. O., 2006. Avaliação tecnológica, operacional e de gestão de sistemas híbridos para geração de eletricidade na Região Amazônica. Universidade Federal do Pará.
- [55] Souza Filho, A. J. T. D., 2019. Análise da Viabilidade de Sistema Híbrido Biogás-Solar na Geração de Energia e seus Impactos nas Emissões de Gases. Instituto Federal Goiano – Campus Rio Verde – GO. Disponível em: <<https://repositorio.ifgoiano.edu.br/handle/prefix/636>>. Acesso em: 03 março 2022.
- [56] Alencar, C. A. D., 2018. *Impacto da geração híbrida hidráulica-fotovoltaica no Brasil*. Dissertação de Mestrado, Universidade Tecnológica Federal do Paraná.
- [57] ANEEL, 2012. Resolução ANEEL n° 506, de 4 de setembro de 2012. Estabelece as condições de acesso ao sistema de distribuição por meio de conexão a instalações de propriedade de distribuidora e dá outras providências. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/pubren2012506.pdf>>. Acesso em: 23 abril 2022.
- [58] BRASIL, 2022. Presidência da República. Lei N° 14300/2022. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2022/lei/L14300.htm>. Acesso em: 23 abril 2022.
- [59] BRASIL, 2022. DECRETO N° 10.946/Brasília, Brasil.