MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA
SECRETARIA DE PLANEJAMENTO E DESENVOLVIMENTO ENERGÉTICO

# PNE2050

## PLANO NACIONAL DE ENERGIA

**VERSÃO PARA CONSULTA PÚBLICA**

epe Empresa de Pesquisa Energética

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA

PÁTRIA AMADA BRASIL GOVERNO FEDERAL

# Energia Solar

A energia solar vem sendo a fonte que apresenta o maior incremento de capacidade instalada anualmente no mundo (IRENA, 2020). Isso se explica dados os preços decrescentes verificados nos últimos anos, à robustez tecnológica tendo em vista projetos com mais de 30 anos em funcionamento, o vasto potencial técnico existente e a não emissão de gases de efeito estufa durante a operação dos parques.

Essa tendência mundial também se aplica no Brasil. Por sua localização geográfica, o País recebe elevados índices de incidência da radiação solar (comparados a países onde a tecnologia fotovoltaica está mais desenvolvida) e relativamente uniformes no território nacional, o que permite desenvolver projetos solares viáveis em diferentes regiões. Assim, dada a redução de custos considerada, a fonte solar fotovoltaica se apresenta como alternativa competitiva no fornecimento de energia, podendo contribuir com os compromissos nacionais de redução de gases de efeito estufa.

Adicionalmente, a modularidade da tecnologia fotovoltaica permite o desenvolvimento de projetos de diferentes escalas, centralizados e distribuídos. O desafio será desenhar um modelo que reconheça em que situações o valor locacional da geração distribuída supera os ganhos de escala propiciados pela geração centralizada (para mais detalhes ver a seção de Recursos Energéticos Distribuídos).

Por fim, cabe ainda mencionar uma linha de desenvolvimento tecnológico que busca integrar as células fotovoltaicas em materiais construtivos, como telhas e vidros. É conhecida como *building-integrated photovoltaics* (BIPV). Esse é um conceito que dialoga com a geração distribuída, mas também pode ser entendido como uma forma de eficiência energética, ajudando a reduzir o consumo líquido das edificações.

Em relação à tecnologia heliotérmica, seu maior diferencial é a possibilidade de maior controle de despacho por meio de sistemas de armazenamento térmico, o que reduz a variabilidade da geração e aumenta o tempo de operação diário. No entanto, nos últimos anos houve certa estagnação no desenvolvimento de novos projetos comerciais no mundo, o que atrasa o desenvolvimento da tecnologia, especialmente sob o aspecto econômico, com a evolução mais lenta de uma curva de aprendizado e baixa economia de escala, com perspectiva de continuar como uma tecnologia relativamente cara para os padrões brasileiros, mesmo no horizonte de 2050. Portanto, com as perspectivas atuais de evolução dessa fonte, são baixas as expectativas para o avanço dessa tecnologia no País. Entretanto, é importante um acompanhamento das atividades internacionais para verificar possíveis oportunidades no futuro.

**Estimativa dos Recursos**

Diferentemente de outras fontes, a energia solar possui seu recurso disperso de maneira relativamente homogênea no território nacional, e a disponibilidade do recurso primário é virtualmente infinita. Em estudo anterior (EPE, 2016), o potencial técnico de conversão fotovoltaica foi estimado excluindo-se unidades de conservação, terras indígenas, comunidades quilombolas, áreas de Mata Atlântica com vegetação nativa, áreas urbanas, reserva legal e área de preservação permanente. Foram consideradas apenas áreas com declividade inferior a 3%, e área superior a 0,5 km², obtendo-se o mapa de potencial apresentado na Figura 42.

Para estimativa quantitativa do potencial indicado neste Plano, foram consideradas apenas as áreas já antropizadas, ou seja, não foram incluídas áreas com vegetação nativa. Considerando apenas as melhores áreas disponíveis, com radiação superior a 6 kWh/m².dia, seria possível a instalação de 307 GWp.

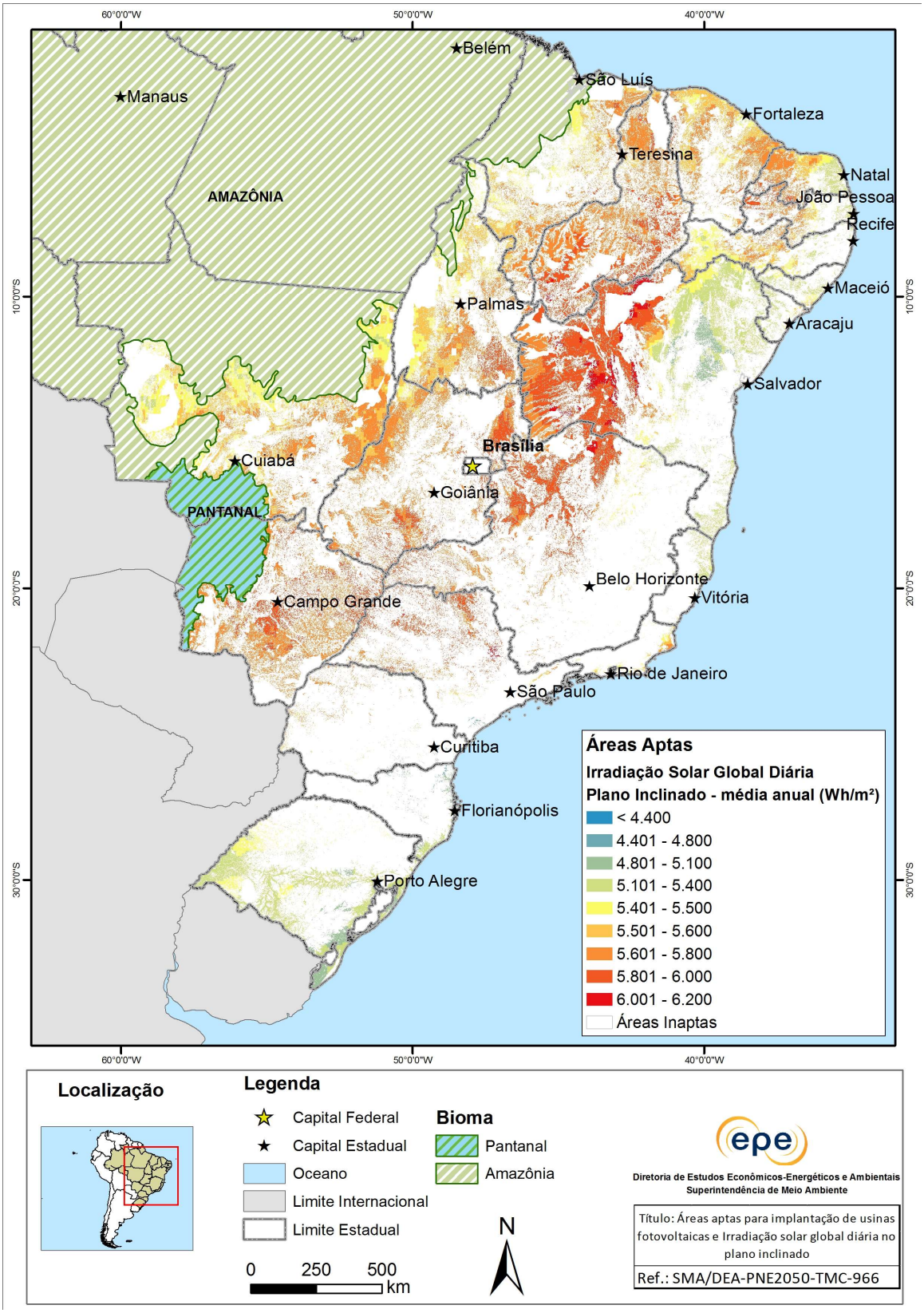



Figura 42 - Áreas aptas para a instalação de usinas fotovoltaicas

**Perspectivas Tecnológicas**

Um fator que insere incerteza com relação à inserção da fonte solar fotovoltaica no planejamento de longo prazo é a velocidade com que ocorre sua evolução tecnológica. Soluções propostas são adotadas rapidamente pela indústria, e as características dos projetos tornam-se obsoletas em poucos anos. Como exemplo relevante para o mercado brasileiro, cita-se a rapidez da transição dos projetos de estrutura fixa para sistemas de rastreamento em um eixo. Em apenas 3 anos, houve completa inversão na consideração dos projetos participantes dos leilões de energia do mercado regulado. Se em 2014, 91% dos empreendimentos consideravam o uso de estrutura fixa, em 2017, 97% propunha o uso de rastreamento em um eixo (EPE, 2018).

A evolução na tecnologia de células é outro exemplo notável. Novas variações de células de silício são adotadas a cada ano, seja com mudança nas características intrínsecas ao material, redução na espessura das células ou mudanças na estrutura dos contatos. Há ainda a perspectivas de novos materiais em substituição aos tradicionais módulos de silício cristalino. Ao final de primeira década do século XXI, houve um pico na participação de mercado dos módulos de filmes finos da chamada segunda geração, silício amorfo, CIGS e telureto de cádmio. Destas, atualmente apenas a última mantém sua competitividade. Uma terceira geração de tecnologias está em desenvolvimento, dentre quais pode-se citar as células sensibilizadas por corantes, células orgânicas, células de perovskita, células CZTS (e suas variações) e células sensibilizadas por pontos quânticos.

No nível de módulos, também há aprimoramentos constantes. Nos últimos anos, os módulos aumentaram seu tamanho padrão, de cerca de 1,6 m² para 2 m², o número de células foi incrementado e novas configurações foram propostas, com uso de células cortadas ao meio, e com o polímero posterior sendo substituído por um segundo vidro, permitindo o aproveitamento da radiação nesta face (em células que tenham essa característica), nos chamados módulos bifaciais. Estes módulos podem aumentar a geração em até 50% em relação aos módulos convencionais (EPRI, 2016). Muitos desses avanços causarão, em alguma medida, a diminuição da demanda de área para a implantação de usinas solares, reduzindo os impactos ambientais relacionados a mudanças no uso da terra ocasionadas pela instalação de novas usinas, como por exemplo o desmatamento. Há também alternativas tecnológicas voltadas à diminuição da demanda de água para a limpeza dos painéis fotovoltaicos, o que pode ser positivo nas áreas com restrições na oferta de água, como no caso do semiárido nordestino que deverá concentrar a maior parte da expansão da fonte.

As evoluções tecnológicas citadas são apenas exemplos da capacidade da indústria fotovoltaica de se reinventar e encontrar novas soluções com impressionante velocidade. Desta maneira, embora não seja possível prever a rota que será trilhada, o setor espera manter a trajetória de queda no custo da energia produzida com o aproveitamento da radiação solar, aumentando sua competitividade e seu potencial de inserção na matriz elétrica mundial.

**Desafios Principais**:

1. *Preparar-se para uma matriz com grande percentual de geração variável não controlável*
   O mundo no século XXI terá que lidar com a grande penetração de fontes solar e eólica, que introduzem maior variabilidade e menor previsibilidade na geração elétrica de curto prazo. O Brasil também terá que superar esse desafio, otimizando a operação da sua matriz existente (predominantemente hidrelétrica), com novos investimentos necessários para garantir a adequabilidade de suprimento, assegurada a devida neutralidade tecnológica na expansão requerida.

2. *Lidar com o descarte e reciclagem de equipamentos*
   O crescimento da tecnologia fotovoltaica é relativamente recente, sendo ainda uma questão a ser equacionada o tratamento dos equipamentos que não possuem mais utilidade para produção de energia. Na prática, a vida útil dos módulos fotovoltaicos tende a ser maior que os 25 anos declarados por seus fabricantes, já que este é o tempo após o qual a potência do equipamento atinge 80% de seu valor nominal. Independente da data de ocorrência, contudo, o grande volume de equipamentos (da ordem de dezenas de bilhões de módulos fotovoltaicos) faz com que o impacto ambiental deste descarte seja relevante.

**Exercícios Quantitativos**

Os exercícios qualitativos relacionados às perspectivas de expansão centralizada da Solar PV dizem respeito aos seguintes aspectos no horizonte do PNE 2050:

1. Qual a competitividade da geração centralizada solar fotovoltaica no horizonte de 2050 nos casos estudados? Em particular, como sua participação relativa está relacionada com a expansão da capacidade instalada de hidrelétricas?
2. Como seria a evolução da matriz elétrica se a fonte solar tiver qualquer impedimento que restrinja sua expansão?

*1. A competitividade relativa da geração solar fotovoltaica*

Assim, como no caso da fonte eólica, espera-se uma expansão significativa da fonte solar fotovoltaica por conta da perspectiva de evolução de sua competitividade no horizonte do PNE 2050. Na maior parte dos casos rodados e, levando em conta apenas a geração centralizada, a fonte solar fotovoltaica atinge aproximadamente entre 27 a 90 GW em termos de capacidade instalada e entre 8 a 26 GW médios em termos de energia em 2050 (Figura 43), denotando sua crescente importância na matriz elétrica no horizonte (em torno de 5% a 16% da capacidade instalada total ou de 4% a 12% em termos de energia total em 2050, sem contar a parcela de GD FV na matriz).

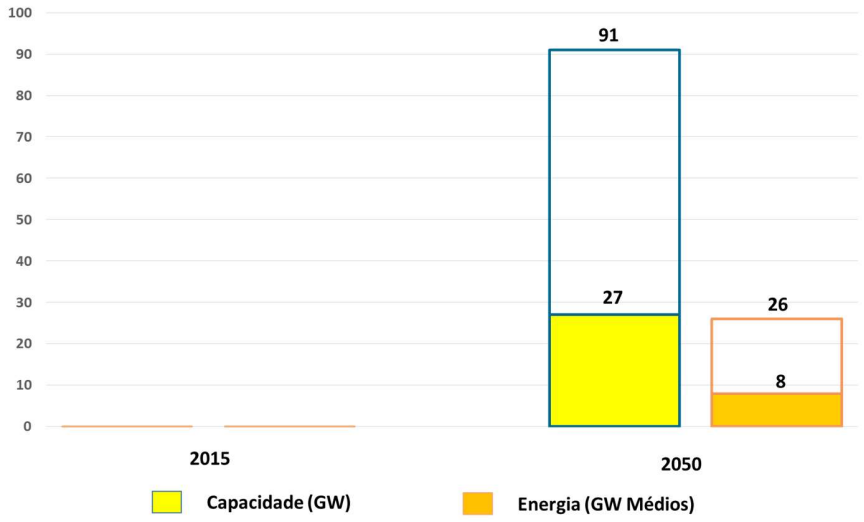



**Figura 43 - Evolução esperada da expansão (centralizada) da solar PV no Cenário Desafio da Expansão**

Tal expansão ocorre predominantemente nas últimas décadas do horizonte, quando esta apresenta maior competitividade. Adicionalmente, ao comparar a expansão da fonte solar fotovoltaica com a de UHEs (Ver também seção de Hidrelétricas), fica claro que restrições à expansão destas últimas, quer seja por questões legais, por efeitos de mudanças climáticas ou por outras razões, fazem com que a fonte solar acabe por preencher a limitação na expansão das UHEs em termos de capacidade instalada (Figura 44).

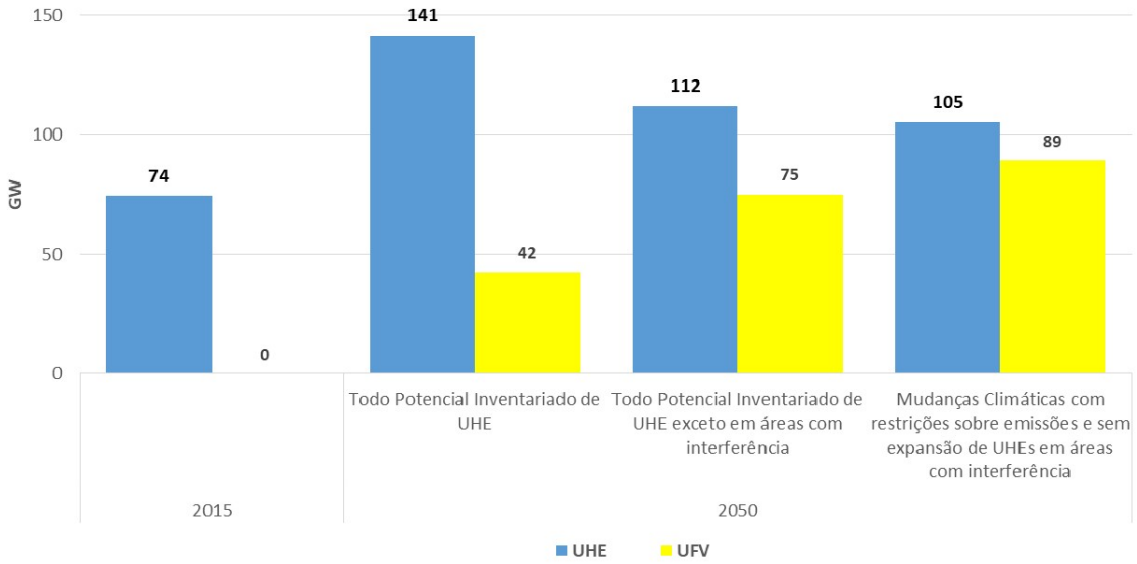



**Figura 44 - Análise Comparada da Expansão da Capacidade Instalada de Solar PV e UHE em casos selecionados**

Além disso, a capacidade instalada total centralizada de solar PV em 2050 pode ser superior a 100 GW se considerarmos alguns casos especiais, tais como: em substituição à expansão da eólica (no caso analisado, alguma eventual restrição que impeça sua capacidade instalada total ultrapassar 50 GW em 2050) ou quando a expansão da transmissão estiver limitada (no caso extremo analisado, aos leilões até 2019). Nesses dois casos, a capacidade instalada referente aos projetos fotovoltaicos na geração centralizada atinge em torno de 95 GW e 190 GW, respectivamente. Tais valores correspondem a uma participação da solar PV centralizada entre 18% e 30% da capacidade instalada total do sistema em 2050, com pouca variação entre os casos em que a cesta de UHEs em áreas de proteção está disponível ou não.

Por outro lado, caso todo o potencial hidrelétrico inventariado esteja disponibilizado, a expansão da geração solar perde parte da competitividade, se houver o aumento do fator de capacidade das usinas a biomassa de cana, com a utilização do seu parque o ano todo (UTE a Biomassa no ano inteiro) ou uma combinação de repotenciação com usinas a biomassa de cana com geração o ano inteiro (Figura 45).

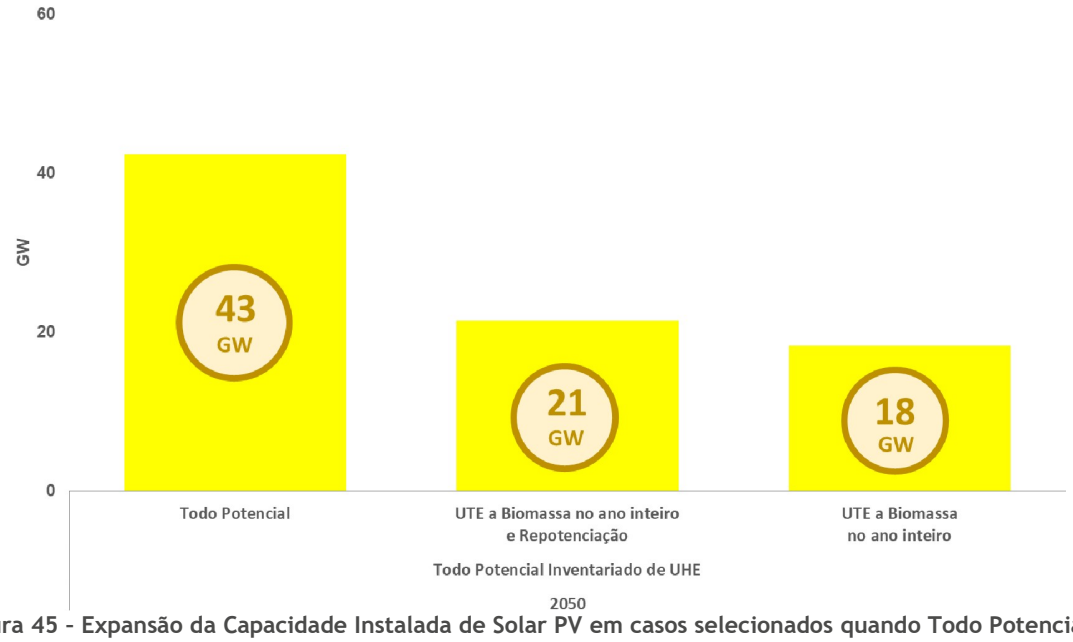
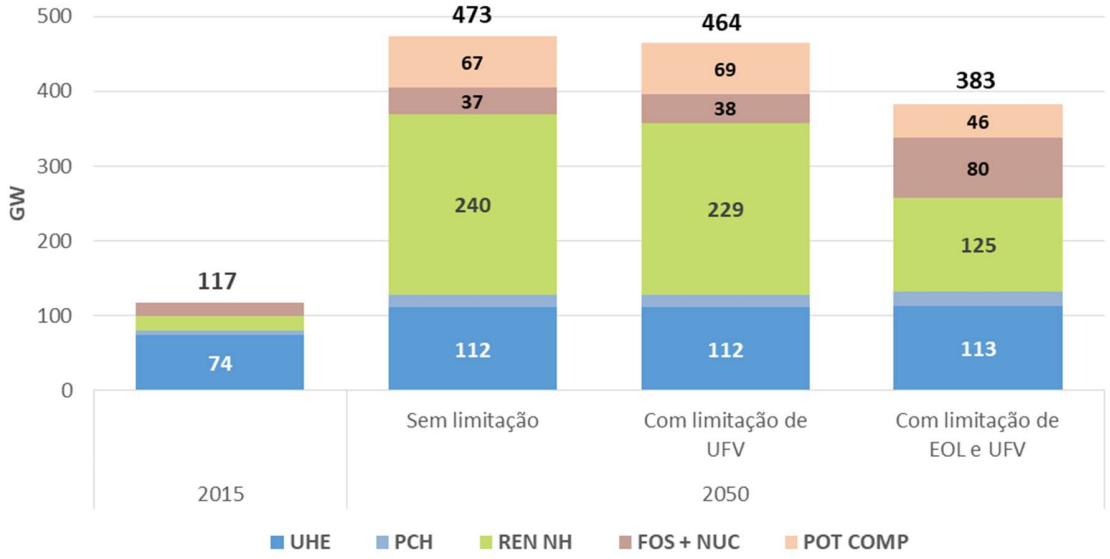



**Figura 45 - Expansão da Capacidade Instalada de Solar PV em casos selecionados quando Todo Potencial Inventariado de UHE está disponível à expansão**

*2. Impactos de uma expansão da geração solar limitada a 50 GW no horizonte de 2050*

No outro extremo, quais seriam os impactos de alguma limitação na expansão da solar PV na evolução da matriz elétrica? De modo a analisar uma possível frustração na expectativa de forte expansão das fontes renováveis não controláveis, também foi considerada, no caso da solar PV centralizada, uma limitação da expansão da capacidade de geração solar fotovoltaica, tendo como base de comparação os casos em que a cesta de projetos de UHEs com interferência em áreas de proteção não está disponível para a expansão: além do caso hipotético com a limitação da capacidade instalada total de eólicas e solar fotovoltaica a 50 GW cada uma em 2050, já apresentado na discussão sobre a fonte eólica, considerou-se uma limitação de 50 GW no horizonte apenas na capacidade instalada centralizadas de usinas solares PV em 2050 com o intuito de verificar seu impacto na matriz resultante. Neste último caso, vê-se que principalmente a fonte eólica ocupa, em termos relativos, um maior espaço na matriz resultante final em 2050, com crescimento significativo da capacidade instalada total no fim do horizonte em comparação com o caso em que a limitação ocorre tanto na capacidade instalada de eólicas e solar PV (Figura 46).




| Casos | Sem limitação: *Sem imposição de limitação na expansão da capacidade instalada de Eólica e de PV Solar no horizonte* | Com limitação de UFV: *Capacidade Instalada de Solar PV limitada a 50 GW no horizonte* | Com limitação de EOL e UFV: *Capacidade Instalada de Eólica e de PV Solar limitadas a 50 GW (cada uma) no horizonte* |
|---|---|---|---|
| VPL do Custo Total da Geração Centralizada (R$ bilhões) | 742 | 746 | 801 |

**Figura 46 - Efeitos da Limitação na Expansão das Fontes Renováveis não Controláveis em 2050, quando a cesta de projetos de UHEs em área de interferência não está disponível**

**Recomendações**:

1. *Desenvolver novas ferramentas, tecnologia e modelos de negócios para previsão da geração solar e gestão da operação do sistema elétrico.*

   A perspectiva de aumento significativo da participação da geração não-controlável na matriz elétrica brasileira, como a solar e eólica, torna a previsão de geração dessas fontes um elemento central na sua integração ao SIN. Assim, como no caso da fonte eólica, tem havido um esforço no estudo e aprimoramento de modelos de previsão de curto prazo (dia seguinte) da geração dessas fontes, no sentido de otimizar os recursos do sistema e trabalhar com menores quantidades de reservas operativas.

2. *Incorporar melhorias aos estudos socioambientais relativos à fonte solar.*
   Dadas as perspectivas da expansão da fonte, os estudos socioambientais devem seguir padrões de qualidade que visem ao embasamento coerente da matriz dos impactos ambientais identificando a equação completa de benefícios e ônus dos empreendimentos. Dessa forma, será possível garantir uma definição consistente dos planos, programas e medidas socioambientais para monitoramento, mitigação ou compensação dos impactos, bem como dos custos para a adequada expansão da fonte. Diante do potencial de expansão associado a usinas híbridas, merece destaque a importância da avaliação do conjunto de empreendimentos que também considere cumulatividades ou sinergias de impactos. É necessário que todas as instituições engajadas no processo de licenciamento ambiental estejam comprometidas na construção de avaliações de impactos ambientais com metodologias robustas que proporcionem clareza e qualidade técnica na identificação das questões socioambientais prioritárias

3. *Integrar as perspectivas de expansão da geração solar e o planejamento da expansão da transmissão.*
   Os prazos de implantação da fonte solar, muito inferiores aos prazos de implantação de projetos de transmissão, permanecerão sendo elementos desafiadores para o planejamento da expansão da transmissão, o que corrobora a necessidade contínua de antecipação das etapas desse planejamento por meio da realização dos estudos prospectivos. Esses estudos, elaborados com base na perspectiva de implantação de futuros projetos de geração e na necessidade de aumento de confiabilidade para atendimento ao crescimento de mercado, deverão dotar o sistema de flexibilidade suficiente para fazer frente à alta granularidade espacial desse tipo de fonte, às incertezas inerentes ao planejamento indicativo da geração e à variabilidade na produção de energia tanto em escala sazonal quanto escala horária.

4. *Articular com atores governamentais e setoriais para endereçar a regulação relativa à reciclagem dos componentes do sistema fotovoltaico.*
   A reciclagem dos componentes não é um processo tecnologicamente desafiador, mas é necessário haver articulação com órgãos ambientais e instituições governamentais para a regulamentação de descarte que gere incentivos ao desenvolvimento de uma cadeia industrial voltada à logística de descarte e reciclagem de tais componentes.

Mapa do Caminho - Energia Solar

| Desafios | Recomendações | | |
|---|---|---|---|
| | 2020 - 2030 | 2030 - 2040 | 2040 - 2050 |
| *Preparar-se para uma matriz com grande percentual de geração variável não controlável* | *Desenvolver novas ferramentas, tecnologias e modelos de negócios para previsão da geração solar e gestão da operação do sistema elétrico* | | |
| | *Incorporar melhorias aos estudos socioambientais desenvolvidos para projetos de geração solar em uma perspectiva de questões ambientais decorrentes de efeitos cumulativos* | | |
| | *Integrar as perspectivas de expansão da geração solar e o planejamento da expansão da transmissão* | | |
| *Lidar com o descarte e reciclagem de equipamentos* | *Articular com diferentes atores governamentais e setoriais para endereçar a regulação relativa à reciclagem dos componentes do sistema fotovoltaico.* | | |