



MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA
SECRETARIA DE PLANEJAMENTO E DESENVOLVIMENTO ENERGÉTICO



PNE 2050

PLANO NACIONAL DE ENERGIA



VERSÃO PARA
CONSULTA PÚBLICA



MINISTÉRIO DE
MINAS E ENERGIA



Fontes e Tecnologias

Nesta seção são apresentadas as perspectivas em relação às principais fontes e tecnologias de produção de energia no horizonte de 2050: hidreletricidade, energia eólica, energia solar, bioenergia, energia nuclear, carvão mineral, recursos energéticos distribuídos (RED) – desmembrados ainda em geração distribuída (GD) e tecnologias de armazenamento, tecnologias disruptivas, petróleo e gás natural.

Embora a visão de longo prazo seja eminentemente integrada e resultado de uma multiplicidade de alternativas de suprimento de energia, a análise desagregada por fonte ou tecnologia permite avaliar questões pertinentes a desafios para a sua respectiva expansão dentro da ótica do tomador de decisão de política energética. Em outras palavras, não se trata neste relatório de reexaminar os desafios associados à fonte ou tecnologia em termos de desenvolvimento tecnológico, evolução de custos ou apoio à PD&I, mas sim de apresentar aqueles desafios nos quais as autoridades do setor de energia podem atuar diretamente ou em conjunto com as autoridades de outros setores no sentido de destravar entraves à sua expansão.

Como resultado, as recomendações derivadas desses desafios procuram orientar o tomador de decisão de política energética no nivelamento das condições normativas, regulatórias e de políticas energéticas com o intuito de gerar um ambiente competitivo, isonômico e transparente para incentivar a sociedade (empresas, investidores e consumidores) na direção do melhor aproveitamento dos vários recursos do País.

Dessa forma, a análise por fonte ou tecnologia é conduzida do seguinte modo: após um panorama geral do status atual para cada fonte ou tecnologia, são apresentadas resumidamente a estimativa de recursos e as perspectivas tecnológicas no horizonte de 2050. Em seguida, são listados os desafios a serem enfrentados pelo tomador de decisão de política energética no desenho da sua estratégia de longo prazo. Para algumas fontes e tecnologias são desenvolvidas análises quantitativas em torno de questões de interesse para o melhor entendimento dos diferentes obstáculos e caminhos possíveis no horizonte de decisão que embasarão as recomendações em termos de orientação estratégica que se seguem (esse item é tratado com mais detalhe a seguir). Por fim, um mapa do caminho relacionando esquematicamente os principais desafios e recomendações é apresentado. As recomendações são ainda divididas por décadas de forma a refletir o período necessário para sua implementação. Como se constituem em orientações estratégicas ou diretrizes, sua implementação requer seu desdobramento em termos de um plano de ação a ser estabelecido em fase posterior do PNE 2050.

Análises Quantitativas

As simulações conduzidas no âmbito deste relatório têm como objetivo ilustrar quantitativamente a evolução de longo prazo da matriz elétrica sob diferentes trajetórias de futuro. Por conta da incerteza sobre diversos aspectos dessa evolução (englobando trajetórias de custos de CAPEX e OPEX das tecnologias, evolução da demanda total de energia elétrica, grau de descentralização na geração, entre outros), não é aconselhável apresentar uma única evolução de matriz elétrica resultante para o horizonte de 2050, ainda que as informações mais atualizadas e disponíveis tenham sido utilizadas.

Optou-se, portanto, em condicionar a análise quantitativa a questões de interesse para a evolução de cada fonte sob consideração. A partir dessas questões, foram rodados 64 diferentes casos, cada qual explorando um aspecto relevante para ser analisado em termos de impacto na evolução da matriz elétrica. Os respectivos resultados são apresentados graficamente ao longo do texto de cada fonte de forma mais condensada e com foco na pergunta formulada, mas o detalhamento de cada rodada pode ser visto no Anexo.

Dessa forma, este relatório do PNE 2050 não apresenta uma única matriz elétrica para o horizonte 2050. Contudo, isso não impede que algumas conclusões mais gerais sejam obtidas das diversas rodadas, o que será explorado mais adiante.

Como as simulações foram construídas?

O exercício quantitativo gera uma expansão indicativa da oferta a partir do modelo de decisão de investimentos (EPE, 2018), que define uma expansão ótima do sistema através da minimização do custo esperado total de investimento e

operação, sujeito às principais restrições operativas para o atendimento, em bases trimestrais, à demanda de energia (com único patamar) e demanda máxima de potência instantânea ao longo do horizonte até 2050.

Em relação à demanda de energia, a simulação considera o atendimento relativo à demanda total desconsiderados os ganhos de eficiência energética e a parcela atendida pela autoprodução, mas considerando a parcela atendida por Geração Distribuída. Esta, por sua vez, tem sua evolução dada na Tabela 10 da seção Geração Distribuída, de acordo com o cenário considerado. Dessa forma, a simulação se concentra propriamente na evolução do sistema centralizado ao longo do horizonte até 2050.

Com a perspectiva de crescente participação de fontes energéticas não-controláveis na matriz elétrica no horizonte de 2050, torna-se necessária adicionalmente a incorporação do balanço de potência, já que uma análise de atendimento puramente energética redundaria em uma contratação excessivamente concentrada em fontes energéticas com baixa capacidade de controle, em virtude de sua competitividade relativa. Por outro lado, como a contribuição dessas fontes para o balanço de potência pode ser relativamente baixa dependendo do perfil da carga no futuro, poderia haver uma superestimação da sua real contribuição. Dessa maneira, a inclusão da análise do balanço de potência permite uma melhor avaliação das condições de atendimento à carga no futuro, garantindo a adequabilidade do sistema, se comparada com uma análise pura de atendimento da demanda energética por meio de balanços médios.

Contudo, com a ampliação dos horizontes de estudo aumentam-se também as incertezas sobre as condições de atendimento à demanda instantânea. Nesse sentido, considerar de uma única maneira a contribuição das fontes energéticas não controláveis, pode levar a resultados simplificados e percepções equivocadas dos caminhos a se seguir, mesmo que essas representações sejam diferentes das utilizadas no horizonte de planejamento mais curto. Dessa forma, considerou-se que as contribuições das fontes eólica e solar PV ao balanço de potência nas simulações conduzidas no PNE 2050 eram não-nulas. A contribuição para o balanço de potência respeitou a sazonalidade dessas fontes nos diferentes subsistemas de forma que a PV contribui apenas nos 1º e 4º trimestres, quando o pico de demanda ocorre à tarde, e a contribuição da eólica é maior na região nordeste.

Os resultados indicam que a contribuição da eólica pode alcançar um patamar ao redor de 20% no balanço de potência, enquanto a solar PV majoritariamente fica abaixo de 10%. Apesar disso, a eólica pode contar com o efeito portfolio em maior intervalo de tempo que a solar PV. Dessa forma, apenas naqueles casos em que a contribuição da Solar PV foi maior do que 10% do balanço de potência ou acima de 10 GW, optou-se adicionalmente por simular o mesmo caso desconsiderando qualquer contribuição sua de modo a se verificar o efeito desta premissa sobre a configuração da matriz elétrica. Nessas simulações sem contribuição da PV para o balanço de potência, a tendência identificada é um aumento da potência instalada de eólica associado a um aumento da potência complementar, em resposta à redução da capacidade instalada de solar PV.

Outra questão que emerge em relação ao balanço de potência é a necessidade de complementação de potência. Como diversas tecnologias provêm esse serviço, foi escolhida a de mais fácil representação para a modelagem. Enquanto os sistemas de acumulação adicionam carga ao sistema, as tecnologias de geração com disponibilidade rápida podem ser representadas da mesma maneira que as tecnologias de geração elétrica. Dessa forma, escolheu-se para o papel de potência complementar o grupo moto-gerador a combustão interna com explosão por compressão (ciclo diesel), por seu baixo investimento, custo de operação, manutenção e combustível conhecidos e confiáveis. Optou-se adicionalmente pelo biocombustível (biodiesel) para evitar emissões de poluentes locais e globais. Por fim, qualquer tecnologia que desempenhe papel semelhante a menor custo deslocará parte da opção escolhida dentro do grupo chamado de Potência Complementar.

Quais são os dados de entrada do modelo?

Os dados de entrada para a simulação (Potencial de Recursos e trajetórias de custos, além de outras premissas) podem ser obtidos respectivamente nas seguintes notas técnicas associadas: Potencial de Recursos Energéticos no Horizonte 2050 (NT PR 04/18) e Premissas e Custos da Oferta de Energia Elétrica no Horizonte 2050 (NT PR 07/18). Um resumo das principais premissas e trajetórias de custos é apresentada também no Anexo I.

Quais são os resultados apresentados?

Os resultados apresentados ao longo do texto trazem aspectos mais específicos e gerais das simulações, com foco nas perguntas de interesse em relação a cada fonte e tecnologia analisada. Em alguns casos, agregações das fontes são feitas para melhor apresentação dos resultados. A Tabela 4 apresenta agrupamentos utilizados ao longo das análises nesta seção.

Tabela 4. Fontes e Tecnologias apresentadas nos resultados

<i>Agrupamento</i>	<i>Fontes e Tecnologias</i>	<i>Código na Legenda das Figuras</i>
<i>Hidrelétricas</i>	<i>UHE e PCH</i>	<i>HIDRO</i>
<i>Renováveis Não-Hídricas</i>	<i>Biomassa, Eólica, UFV</i>	<i>REN NH</i>
<i>Eólica + Solar</i>	<i>Eólica e UFV</i>	<i>EOL+UFV</i>
<i>Fósseis + Nuclear</i>	<i>Carvão Mineral, Gás Natural, Derivados de Petróleo e Nuclear</i>	<i>FOS+NUC</i>
<i>Potência Complementar</i>	<i>Termelétrica a Biodiesel</i>	<i>POT COMP</i>

Resultados mais detalhados são apresentados no Anexo e consistem nas seguintes variáveis: evolução da capacidade instalada, evolução da geração média e balanço de potência de 2015 a 2050, com desagregação nos anos de 2030, 2040 e 2050; valor presente do custo total (investimento e operação); consumo de gás no período médio e crítico; e emissões de GEE.

Resultados Gerais

De modo a exemplificar como as análises quantitativas serão apresentadas por fonte nas seções seguintes, são exploradas as seguintes questões de interesse para o desenho da estratégia de longo prazo:

1. Qual o perfil da matriz elétrica no cenário **Estagnação**?
2. Uma matriz 100% renovável é possível e viável economicamente?
3. Qual a diferença entre uma matriz 100% renovável ou aquela sem emissões de gases de efeito estufa no fim do horizonte?

A primeira questão diz respeito à evolução da matriz elétrica em um cenário de menor expansão da demanda de energia elétrica, enquanto as outras duas, à possibilidade de uma matriz elétrica com emissões nulas até 2050.

Outra questão geral de importância nas análises quantitativa consiste, como será visto mais adiante e de forma mais detalhada na discussão sobre Hidrelétricas, no fato de que o resultado da expansão é afetado de maneira significativa se o potencial inventariado com interferência em áreas protegidas está ou não à disposição para o modelo. Dessa forma, foram consideradas duas possibilidades: no primeiro caso, quando apenas o potencial inventariado sem interferência com áreas protegidas (unidades de conservação (UC) e terras indígenas e quilombolas (TI)) – caso denominado **Exceto UC e TI** – e, no segundo, quando todo potencial inventariado está disponível – denominado **Todo Potencial de UHE**.

1. Cenário Estagnação

As simulações conduzidas para este relatório do PNE 2050 estão mais centradas nos desafios do planejador do setor elétrico em um contexto de maior expansão da demanda de energia elétrica, visto que o Brasil é um país de renda média e consumo de energia elétrica com potencial de crescimento, como visto na discussão da página 26.

No entanto, é interessante apresentar como contraponto um cenário em que o consumo de energia elétrica não se altera de modo significativo no horizonte de 2050 em relação aos patamares atuais. No caso em que esse cenário se concretize, o desafio do planejamento do setor elétrico deslocar seu foco para outros objetivos (por exemplo, perfil da matriz elétrica mais adequado a um critério determinado pelo planejador) para além da questão da expansão da capacidade instalada.

O resultado do cenário mostra que o crescimento da potência instalada no sistema centralizado ocorre de forma concentrada no horizonte até 2030, refletindo, em grande parte, os projetos contratados no período entre 2015 e 2019.

Dessa forma, a matriz elétrica em 2050 continua predominantemente hidráulica tanto em termos de capacidade instalada quanto de geração (no período médio), com emissões de GEE decrescentes no período, também como resultado do descomissionamento de usinas termelétricas a combustíveis fósseis ao longo do horizonte. A Figura 21 apresenta os principais resultados da simulação do caso, apresentado com mais detalhes, junto com outros resultados e demais simulações, no Anexo.

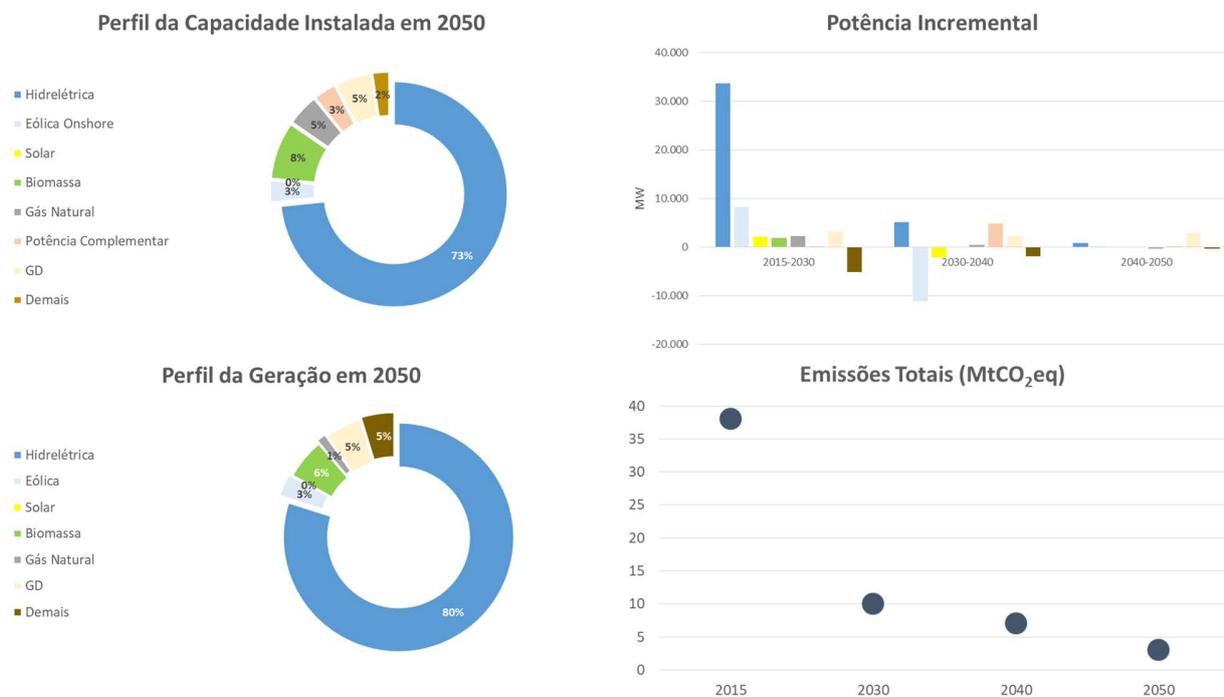


Figura 21 - Resultados Principais do Cenário Estagnação

2. Matriz elétrica 100% renovável

Os resultados das simulações conduzidas sugerem que o grau de renovabilidade da matriz elétrica brasileira continuará alto no horizonte do estudo. Considerando-se que a complementação de potência é totalmente renovável, a Figura 22 mostra como o percentual previsto de renováveis na matriz elétrica (seja medida na geração no período médio ou na capacidade instalada) em 2050 é alta nos casos simulados, (foram excluídos da figura os casos em que alguma restrição quantitativa da capacidade instalada de fontes renováveis tenha sido imposta no exercício simulado).

A conclusão não se modifica substancialmente, ainda que, no outro extremo, a complementação de potência fosse totalmente não renovável: neste caso, o gráfico sofreria um deslocamento vertical médio de 12% (que representa a participação média da potência complementar na capacidade instalada total em 2050 nos casos simulados), mantendo-se um patamar esperado de mais de 75% de fontes renováveis na capacidade instalada em 2050.

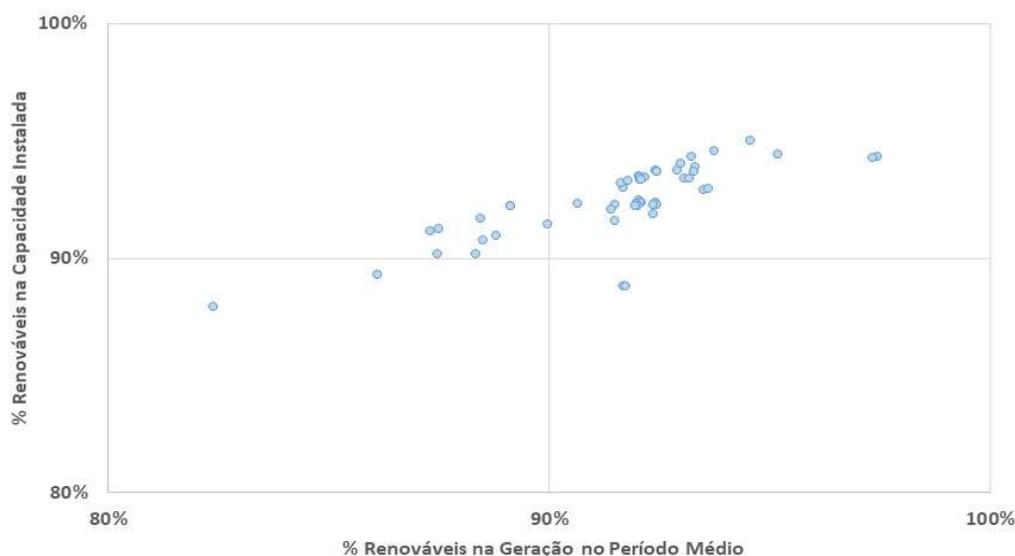


Figura 22 - Participação de fontes renováveis na matriz elétrica em 2050

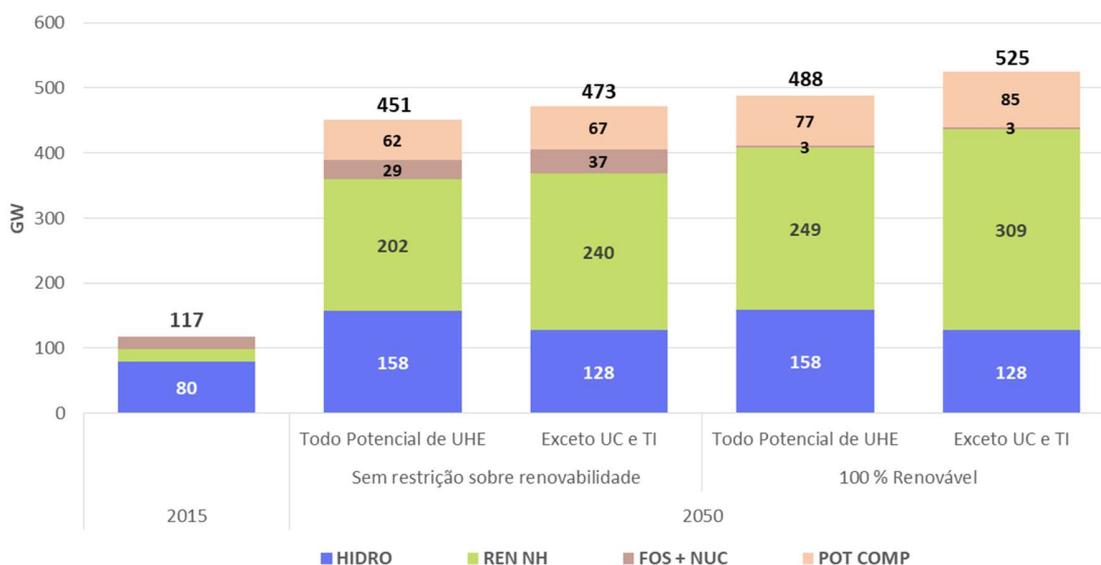
O resultado acima sugere que, embora as simulações conduzidas se restrinjam apenas às questões de interesse deste estudo (não refletindo, portanto, todas as possibilidades de futuro no horizonte de 2050), não se estaria, provavelmente, muito longe de se obter uma matriz elétrica totalmente renovável.

Assim, a fim de se testar a viabilidade desta possibilidade, restringiu-se o conjunto de projetos na cesta de expansão apenas àqueles renováveis. O resultado, apresentado na Figura 23, mostra que uma matriz elétrica praticamente 100% renovável poderia ser alcançada no sistema centralizado em 2050 desde que a complementação de potência (de 77 GW a 85 GW de capacidade instalada em 2050) também fosse feita a partir de fontes renováveis. A parcela não-renovável da matriz (de cerca de 0,5% da capacidade instalada em 2050) corresponderia às termoeletrônicas do complexo de Angra, já que no horizonte de 2050, elas ainda não teriam sido totalmente retiradas do parque de geração nacional.

Adicionalmente, pode-se ver que o resultado da simulação em termos de capacidade instalada total em 2050 varia de acordo com a disponibilidade da cesta de UHEs acima de 30 MW com interferência em áreas protegidas para a expansão (caso chamado de Todo Potencial Inventariado de UHEs) ou não, ou seja, quando apenas aquelas que não possuam tal tipo de interferência estão disponíveis (caso chamado Exceto UC e TI: contam apenas com UHEs sem interferência em áreas de Unidades de Conservação (UC) ou Terras Indígenas ou Quilombolas (TI)).

Verifica-se que, quando todo potencial inventariado de UHEs está disponível, a capacidade instalada total em 2050 é menor e, conseqüentemente, o valor presente líquido do custo da solução é mais baixo em relação ao caso em que a expansão de UHEs está limitada àquelas sem interferência em UC e TI. Dessa forma, as simulações apresentadas ao longo deste relatório farão, sempre que seja importante para a análise, essa distinção em termos da disponibilidade de UHEs acima de 30 MW com interferência em áreas protegidas.

Um aspecto não tratado neste relatório consiste nas implicações em termos de operação do sistema elétrico de uma matriz 100% renovável com grande participação de fontes não-controláveis. Considera-se que, uma vez garantida a adequação dos recursos no longo prazo, a complexidade da questão da segurança do sistema possa ser completamente endereçada nos estudos de planejamento decenal e quinquenal do sistema (PDE, PET e PEN). Por fim, resultados mais detalhados do caso, com informações sobre a expansão, por tecnologias selecionadas, da capacidade instalada total, geração no período médio e balanço de potência podem ser encontrados no Anexo.



Casos relativos a todo o potencial inventariado de UHEs acima de 30 MW	Sem restrição sobre renovabilidade: Não há qualquer restrição a expansão de UTEs a combustíveis fósseis		100% renováveis: Não é permitida expansão de UTE a combustíveis fósseis	
	Todo Potencial de UHE: Inclui todo potencial inventariado de UHE acima de 30 MW	Exceto UC e TI: Considera na expansão apenas UHEs sem interferência em áreas protegidas	Todo Potencial de UHE: Inclui todo potencial inventariado de UHE acima de 30 MW	Exceto UC e TI: Considera na expansão apenas UHEs sem interferência em áreas protegidas
VPL do Custo Total da Geração Centralizada (R\$ bilhões)	723	742	767	794

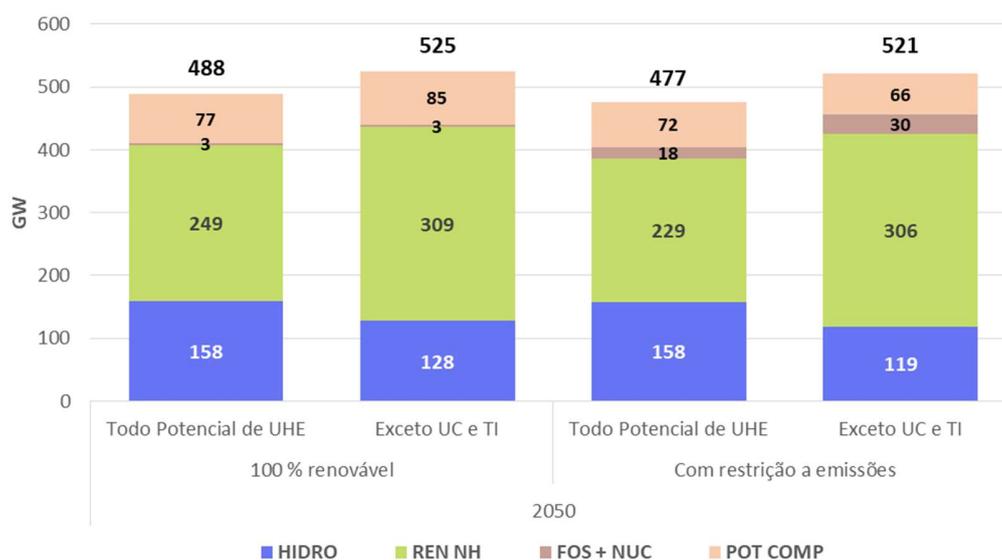
Figura 23 - Expansão com redução de disponibilidade hídrica com e sem restrições de emissões

3. Matriz elétrica: 100% renovável ou não emissora?

A análise anterior apresentou uma simulação em que uma matriz sem emissões de GEE é obtida impedindo-se a expansão de UTEs a combustíveis fósseis. No entanto, uma possibilidade menos restritiva seria permitir a expansão de qualquer tecnologia de geração que não produza emissões, como, por exemplo, as tecnologias com sequestro e armazenamento de carbono (CCS).

Ao se comparar o resultado desta simulação com a expansão apenas a partir de fontes renováveis (Figura 24), observa-se que, em 2050, suas capacidades instaladas totais são aproximadamente iguais, porém, com maior participação de fontes não-renováveis compensada, em grande parte, por uma menor participação da combinação de fontes renováveis não-hídricas e potência complementar no caso da expansão com restrição de emissões.

Como consequência, há uma redução no valor presente líquido do custo total, indicando que, caso as perspectivas de custos utilizadas neste estudo se confirmem, uma matriz de baixo carbono é obtida a menor custo por meio de uma expansão que não se limita apenas às fontes renováveis, mas inclui também na cesta de expansão toda tecnologia não emissora.



Casos relativos a todo o potencial inventariado de UHEs acima de 30 MW	100% renováveis: <i>Não é permitida expansão de UTE a combustíveis fósseis</i>		Com restrição sobre emissões: <i>É permitida expansão apenas de tecnologias que não emitam</i>	
	Todo Potencial de UHE: <i>Inclui todo potencial inventariado de UHE acima de 30 MW</i>	Exceto UC e TI: <i>Considera na expansão apenas UHEs sem interferência em áreas protegidas</i>	Todo Potencial de UHE: <i>Inclui todo potencial inventariado de UHE acima de 30 MW</i>	Exceto UC e TI: <i>Considera na expansão apenas UHEs sem interferência em áreas protegidas</i>
VPL do Custo Total da Geração Centralizada (R\$ bilhões)	767	794	747	772

Figura 24 - Expansão 100% renovável vs. expansão com restrição a emissões