



**XXIII SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

FI/GPL/30
18 a 21 de Outubro de 2015
Foz do Iguaçu - PR

GRUPO - VII

GRUPO DE ESTUDO DE PLANEJAMENTO DE SISTEMAS ELÉTRICOS - GPL

ESTUDOS ENERGÉTICOS PARA INDICAÇÃO DA EXPANSÃO DAS INTERLIGAÇÕES PARA O ESCOAMENTO DA ENERGIA DAS USINAS HIDRELÉTRICAS DO COMPLEXO TAPAJÓS

Renata Nogueira Francisco de Carvalho(*)
EPE

Glaysson de Mello Muller
EPE

Renato Haddad Simões Machado
EPE

Roney Nakano Vitorino
EPE

Simone Quaresma Brandão
EPE

RESUMO

O artigo apresenta os estudos energéticos para identificação da alocação da energia produzida pela UHE São Luiz do Tapajós e pelas outras usinas hidrelétricas que poderão compor o complexo das bacias dos rios Tapajós e Jamanxim, que somam aproximadamente 13 GW de capacidade instalada. Após aferir o destino dessa energia, a segunda etapa do estudo consistiu na indicação das expansões das linhas de transmissão do Sistema Interligado Nacional (SIN) para o adequado escoamento da produção destas usinas.

PALAVRAS-CHAVE

Estudos Energéticos, Planejamento da Expansão, Alocação de Energia, Capacidades das Interligações

1.0 - INTRODUÇÃO

O planejamento da expansão do sistema elétrico brasileiro envolve a identificação e priorização de um conjunto de obras de geração e transmissão de energia elétrica, distribuídos ao longo do tempo, para o atendimento a uma determinada projeção de demanda dentro do horizonte de estudo, que minimize o valor presente dos custos de investimento e operação.

As interligações permitem a otimização dos recursos energéticos disponíveis nas regiões do país e também o escoamento da energia gerada distante dos centros de carga. Neste trabalho, estes dois objetivos nortearão a indicação de um plano de expansão das interligações coerente com o incremento da oferta de energia por meio de fontes renováveis, em especial os aproveitamentos hidrelétricos, que estão localizados, majoritariamente, no Norte do país.

Ao considerar a produção de energia dos aproveitamentos hidrelétricos localizados na bacia dos rios Tapajós (usinas São Luiz do Tapajós – 8.040 MW e Jatobá – 2.338 MW) e Jamanxim (usinas Cachoeira do Caí – 802 MW, Jamanxim – 881 MW, Cachoeira dos Patos – 528 MW e Jardim Ouro – 227 MW), de extensos períodos de motorização, juntamente com a produção do parque gerador previsto no horizonte do planejamento da expansão, ressalta-se a relevância de definir alternativas de expansão das interligações entre os subsistemas constituintes do Sistema Interligado Nacional e mensurar o impacto de cada uma delas, de maneira a escoar o montante de energia proveniente das usinas localizadas neste complexo hidrelétrico.

2.0 - DESENVOLVIMENTO

Os estudos aqui apresentados utilizam as informações anteriores à finalização do Plano Decenal de Expansão de Energia 2023 (PDE 2023), as quais, entretanto, não comprometem os resultados. A seguir serão descritas as

(*)Av. Rio Branco, 1 / 11º – CEP 20.090-003 Rio de Janeiro, RJ – Brasil
Tel: (+55 21) 3512-3317 – Email: renata.francisco@epe.gov.br

premissas consideradas acerca da oferta de energia associada ao cronograma de motorização das usinas do complexo do Tapajós, as expansões de transmissão já previstas no horizonte desse plano e, por fim, as novas interligações propostas em cada uma das alternativas de conexão das usinas hidrelétricas analisadas.

2.1 Premissas

- O horizonte de estudo é de 15 anos, de maneira a avaliar a operação das usinas com motorização completa;
- A potência instalada das usinas consideradas na bacia dos rios Tapajós e Jamanxim e seus respectivos cronogramas de motorização são apresentados na Tabela 1;
- Para as linhas de transmissão de energia que conectam o N/NE ao SE/CO, o estudo considerou as seguintes capacidades: intercâmbio Xingú → Sudeste (8.000 MW), intercâmbio Imperatriz → Sudeste (4.370 MW) e intercâmbio Nordeste → Sudeste (6.972 MW). A partir destes limites, considerados para o ano de 2019, foram estudadas as ampliações das capacidades de transmissão de energia para o escoamento das usinas hidrelétricas do complexo Tapajós;
- O despacho das usinas é simulado através do modelo Newave - versão 19, considerando 2.000 séries sintéticas de vazões afluentes.

Tabela 1 – Potência instalada das usinas hidrelétricas e seus cronogramas de motorização considerados

Usinas	Potência Instalada (MW) ⁽¹⁾	Início de Motorização	Final da Motorização
Rio Tapajós – 10.378 MW			
São Luiz do Tapajós	8.040	10/2019	12/2025
Jatobá	2.338	01/2021	04/2024
Rio Jamanxim – 2.438 MW			
Cachoeira do Caí	802	08/2024	08/2025
Jamanxim	881	05/2024	11/2024
Cachoeira dos Patos	528	04/2024	10/2024
Jardim Ouro	227	04/2025	10/2025

2.2 Alternativas Estudadas

A conexão do complexo de usinas dos rios Tapajós e Jamanxim ao Sistema Interligado Nacional foi estudada através de três alternativas. Os diagramas esquemáticos da Figura 1 resumem as conexões analisadas.

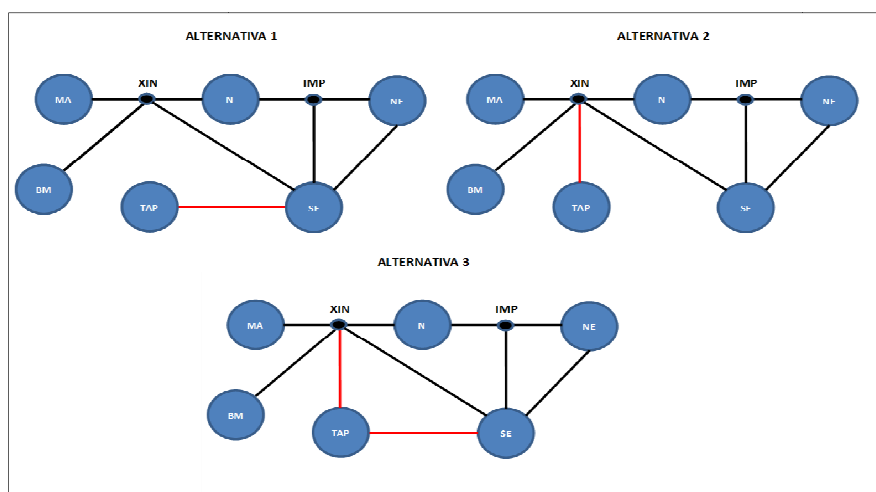


Figura 1 – Alternativas para a conexão das usinas hidrelétricas dos rios Tapajós e Jamanxim

- (1) Potências instaladas consideradas neste estudo, conforme:
- Estudos de viabilidade técnica e econômica da Usina Hidrelétrica São Luiz do Tapajós (Despacho ANEEL nº1341/2014);
 - Estudos de inventário hidrelétrico para as usinas Jatobá, Cachoeira do Caí, Jamanxim, Cachoeira dos Patos e Jardim Ouro (Despacho ANEEL nº1887/2009).

Onde:

- a. Alternativa 1 – Usinas hidrelétricas conectadas ao Sudeste;
- b. Alternativa 2 – Usinas hidrelétricas conectadas ao Norte (nó de Xingú);
- c. Alternativa 3 – Usinas hidrelétricas conectadas ao Sudeste e ao Norte (conexão híbrida).

3.0 - RESULTADOS

Atendendo aos critérios de planejamento de segurança, para o qual o risco de insuficiência da oferta de energia elétrica no SIN, não deve exceder a 5%, em nenhum subsistema, e econômico, que estabelece o princípio da igualdade entre o CMO – Custo Marginal de Operação e o CME – Custo Marginal de Expansão, aferiu-se, para as três alternativas de conexão das usinas hidrelétricas dos rios Tapajós e Jamanxim, a compatibilidade dos custos totais de operação, a alocação da energia produzida pelas usinas do complexo Tapajós, as ampliações das interligações entre subsistemas necessárias para acomodar a produção de energia das usinas analisadas, bem como a avaliação do comportamento fornecedor/recebedor de energia dos subsistemas representativos do SIN.

Os resultados disponibilizados neste artigo correspondem ao ano de 2026, escolhido por contar com a completa motorização das usinas hidrelétricas indicadas na bacia dos rios Tapajós e Jamanxim, de acordo com as premissas adotadas neste estudo em relação a oferta de energia destas usinas no horizonte do planejamento indicativo.

3.1 Compatibilidade das Alternativas Estudadas

Os custos totais de operação, obtidos por simulações com o modelo Newave, foram comparados demonstrando que as três alternativas apresentadas apontam para despachos hidrotérmicos economicamente semelhantes. Os valores dos custos totais de operação são equivalentes estatisticamente (considerando os valores esperados e seus respectivos desvios padrões). Não houve restrições de intercâmbio que impossibilitassem o despacho das usinas hidrelétricas estudadas em suas capacidades, independentemente da alternativa de conexão proposta, como apresentado na Figura 2.

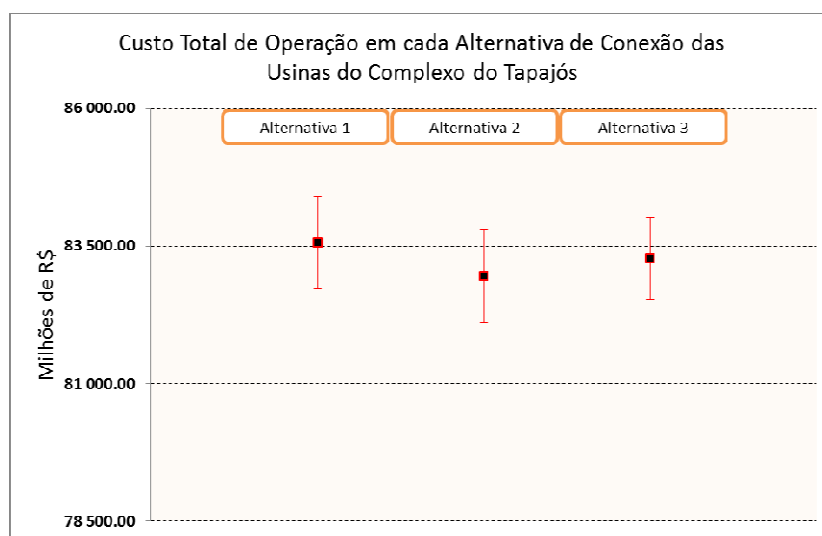


Figura 2 – Alternativas para a Conexão das Usinas Hidrelétricas dos Rios Tapajós e Jamanxim

3.2 Alocação de Energia por Região

Neste item é estimada a alocação média mensal, por região, da energia produzida nas usinas do complexo do Tapajós. As Figuras 3 e 4 apresentam os resultados para as alternativas 1 e 2 com conexão para o Sudeste/Centro-Oeste e Norte, respectivamente.

A parcela predominante da energia proveniente das usinas estudadas é acomodada na região Sudeste, independentemente da alternativa analisada. O maior montante de energia médio mensal, durante o período úmido, é de 8.000 MWmed aproximadamente.

A energia também é alocada significativamente no subsistema Sul. O maior valor médio mensal alocado nesta região é de 2.000 MWmed, independentemente da alternativa de conexão analisada.

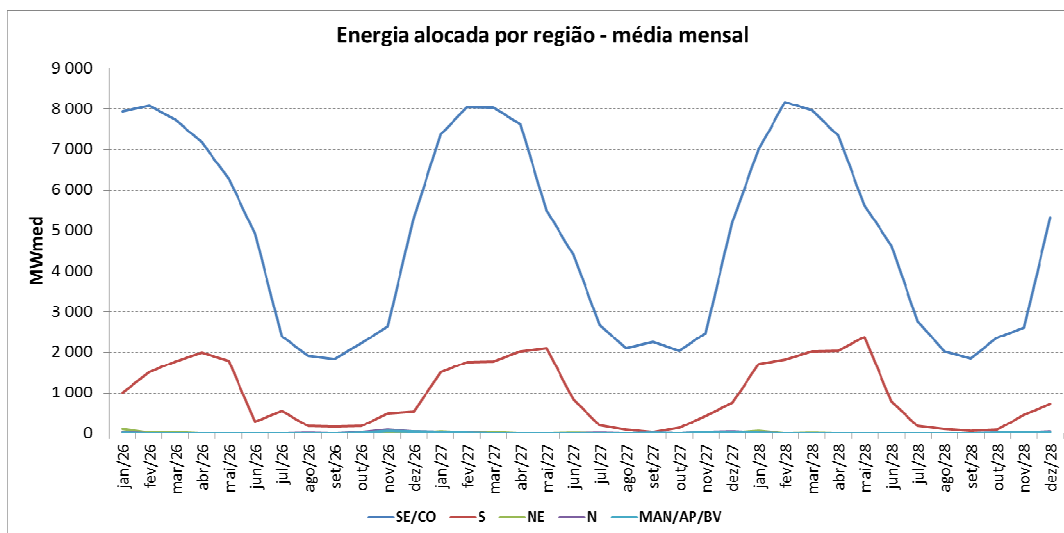


Figura 3 – Alternativa 1: Alocação de Energia por Região

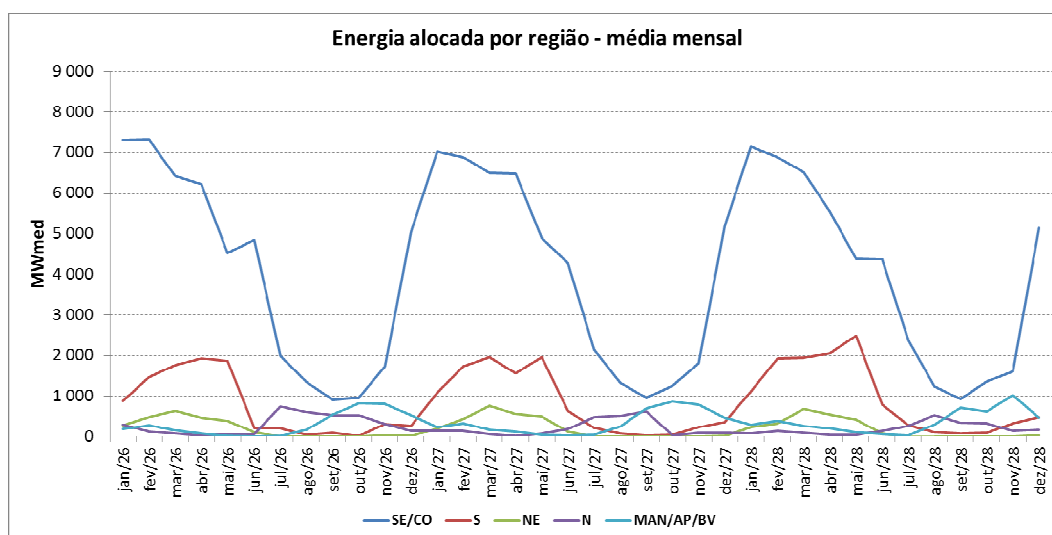


Figura 4 – Alternativa 2: Alocação de Energia por Região

Para aquelas alternativas que fazem uso da conexão ao Norte (Alternativas 2 e 3), ressalta-se a utilização nesta região e também no subsistema Manaus/Amapá/Boa Vista, da energia proveniente das usinas hidrelétricas dos rios Tapajós e Jamanxim. Dado que as regiões Norte e Manaus/Amapá/Boa Vista têm pouca capacidade de regularização, e seu período úmido é equivalente ao do Tapajós, esta alocação de energia ocorre, preponderantemente, no período seco, entre os meses de julho e dezembro. A Alternativa 2, com conexão das usinas na região Norte diretamente, é aquela que apresenta maior alocação de energia nestas regiões, cujo maior montante médio mensal é de 750 MWmed na região Norte e, de 800 MWmed na região Manaus/Amapá/Boa Vista.

Cabe destacar que na Alternativa 1, apesar de não se verificar uma alocação direta nas regiões Norte e Manaus/Amapá/Boa Vista, a região Sudeste, que absorve a energia de Tapajós em um primeiro momento, consegue assim estocar mais água em seus reservatórios no período úmido, podendo deplecioná-los para enviar energia às outras regiões no período seco. O sistema de transmissão entre as regiões SE e N/NE já planejado, considerado no estudo do PDE 2023, é suficiente para transportar essa energia adicional no período seco, não sendo necessários reforços ou expansões adicionais.

As figuras 5 e 6 complementam os resultados anteriores, pois indicam as permanências dos valores mensais de energia alocados em cada região, referentes ao mês de março de 2026. A energia mensal alocada nas regiões Sudeste e Sul atingiu 12.000 MWmed e 8.000 MWmed respectivamente. Para a Alternativa 2 foi verificada a maior alocação de energia na região N/NE/Man, cujo valor estimado foi de 5.600 MWmed. Além disso, nesta alternativa de conexão, a região N/NE/Man absorveu em cerca de 70% dos cenários simulados parte da energia produzida na bacia do Tapajós. Apesar do elevado percentual de cenários nos quais a energia foi destinada a esta região,

ressalta-se que em apenas 10% dos casos o valor foi superior a 2.500 MWmed.

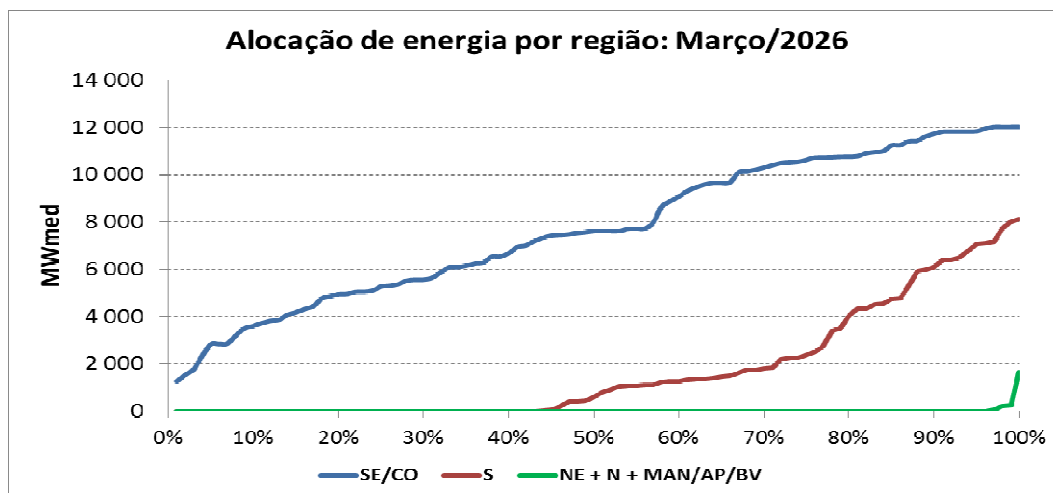


Figura 5 – Alternativa 1: Permanência da Alocação de Energia por Região

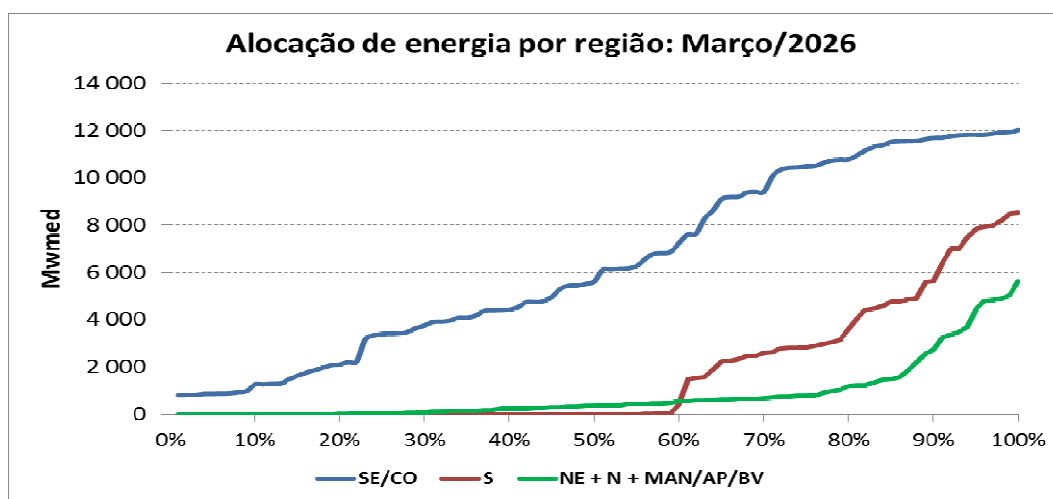


Figura 6 – Alternativa 2: Permanência da Alocação de Energia por Região

3.3 Utilização dos Intercâmbios

3.3.1 Sentidos dos Fluxos de Energia

Além da análise da alocação da energia, foi avaliado o carregamento dos intercâmbios provenientes do subsistema Tapajós, sincronizado com a geração de energia das usinas deste mesmo subsistema.

A figura 7 mostra para a Alternativa 1, com as usinas do Tapajós conectadas ao Sudeste, que o envio máximo da energia do complexo do Tapajós, que ocorre em torno de 25% do total de cenários (linha vermelha representa o fluxo na LT TAP->SE/CO), coincide com os casos de maior envio de energia do Xingú, Nordeste e Imperatriz para a região Sudeste (pontos em azul do gráfico representam o recebimento do Sudeste através das linhas de transmissão de energia com origem no Norte e Nordeste). Com relação ao fluxo de energia no sentido inverso, do Sudeste para o Norte e Nordeste, são verificados poucos cenários (área em destaque no gráfico). Esta operação ocorre com baixa frequência e, quando realizada, não ultrapassa o valor de 5.000 MWmed, apesar das linhas de transmissão de energia possuírem capacidade de exportação da ordem de 15.000 MWmed em direção ao Norte e Nordeste.

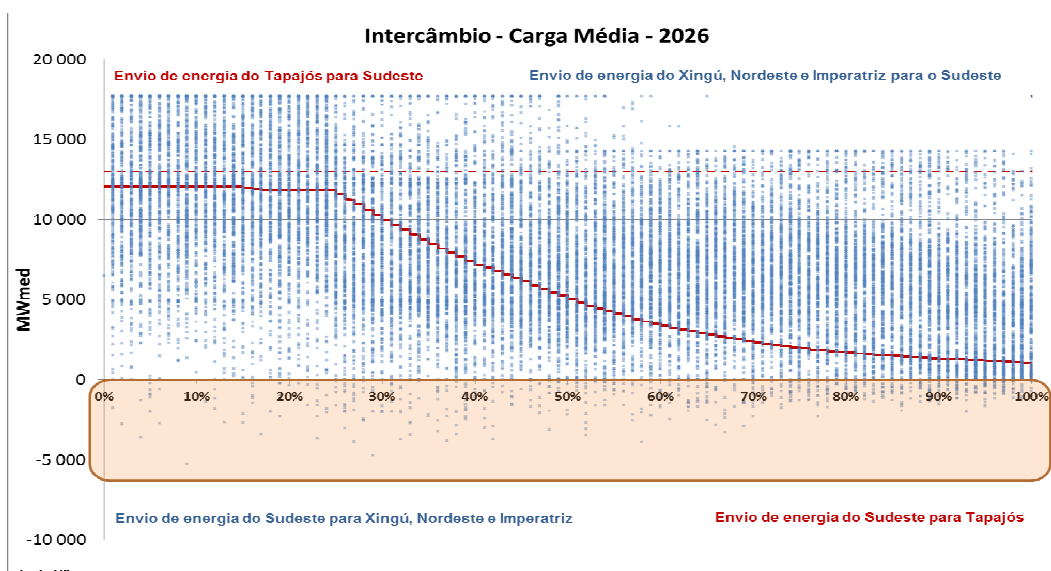


Figura 7 – Alternativa 1: Carregamento da Linha de Transmissão que Interliga o Subsistema Tapajós ao SE

Considerando ainda a Alternativa 1, a figura 8 apresenta o fornecimento da energia do complexo Tapajós para a região Sudeste, sincronizado com os valores de geração de energia controlável para esta região. Destaca-se que no momento em que as usinas hidrelétricas do Tapajós disponibilizam a máxima energia para o Sudeste, período hidrológico favorável, é menor a geração de energia controlável nesta região. Já, no período com menor disponibilidade hidráulica nas usinas do Tapajós, maior é a geração de energia controlável da região Sudeste, refletindo o deplecionamento dos seus reservatórios para auxiliar no suprimento energético do SIN no período seco.

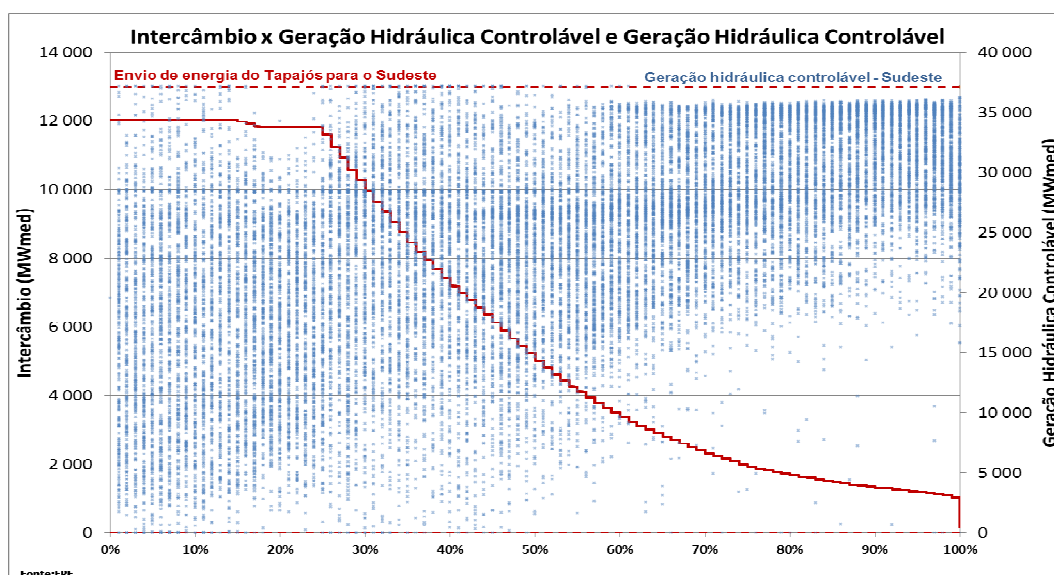


Figura 8 – Alternativa 1: Carregamento da Linha de Transmissão que Interliga o Subsistema Tapajós ao SE e a Geração de Energia Controlável no SE

As análises acima permitem comprovar que a energia produzida pelas usinas do complexo do Tapajós é direcionada para a região SE/CO predominantemente, que tenta maximizar a energia armazenada durante o período úmido de Tapajós. Dessa forma, mesmo no período seco, quando o SE/CO está deplecionando seus reservatórios para auxiliar no atendimento da demanda do SIN, a capacidade de transmissão do SE/CO para as regiões Norte e Nordeste, já em operação e planejada segundo o PDE 2023, é suficiente para garantir o escoamento da energia entre estes subsistemas quando submetidos a esta condição de despacho do parque gerador.

3.3.2 Fornecimento e Recebimento de Energia por Região

Nesta seção são comparados, nas três alternativas, os fluxos de recebimento/fornecimento de energia no

subsistema Sudeste/Centro Oeste – centro de carga mais representativo do SIN.

A figura 9 evidencia o envio da energia gerada na região Norte e Nordeste para o Sudeste nas três alternativas simuladas. Além disso, observa-se que esta condição importadora do SE/CO corresponde a aproximadamente 97% dos cenários simulados. A conexão das usinas do Tapajós ao Norte, Alternativa 2, aponta um maior recebimento de energia da região Sudeste pelo Norte e Nordeste, quando comparado às demais alternativas. Essa diferença é verificada uma vez que as usinas do complexo do Tapajós são conectadas ao nó de Xingú e, portanto, contribuem significativamente para a utilização dos intercâmbios que interligam o Norte/Nordeste ao Sudeste, destacando a ampliação necessária na capacidade das linhas de transmissão abordadas, de modo a garantir o escoamento adequado da produção de energia das usinas do complexo Tapajós.

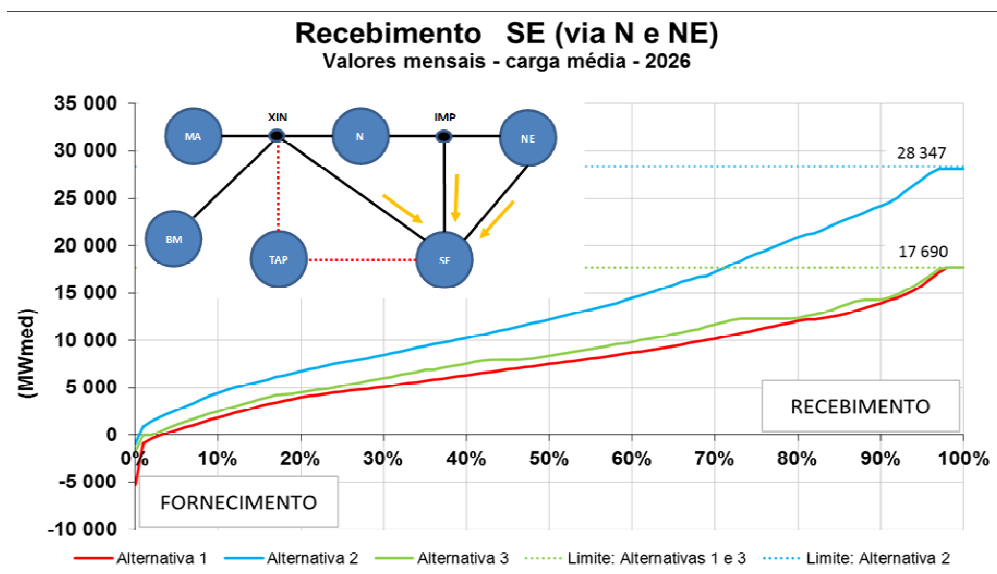


Figura 9 - Fluxo de Recebimento/Fornecimento de Energia pelo Subsistema SE (via Norte e Nordeste)

A figura 10 também indica o recebimento de energia da região Sudeste via Norte/Nordeste. Porém, para as Alternativas 1 e 3, este gráfico contabiliza além do recebimento do Sudeste pelo Norte/Nordeste, o montante de energia absorvido pelo Sudeste proveniente das usinas do Tapajós (intercâmbio Tapajós -> Sudeste). Ao incorporar esta linha no recebimento da região SE/CO, verifica-se que as curvas de permanência do recebimento/fornecimento são semelhantes nas três alternativas estudadas, evidenciando que, independentemente da alternativa de interligação, não há variação no montante de energia exportado para o SE/CO.

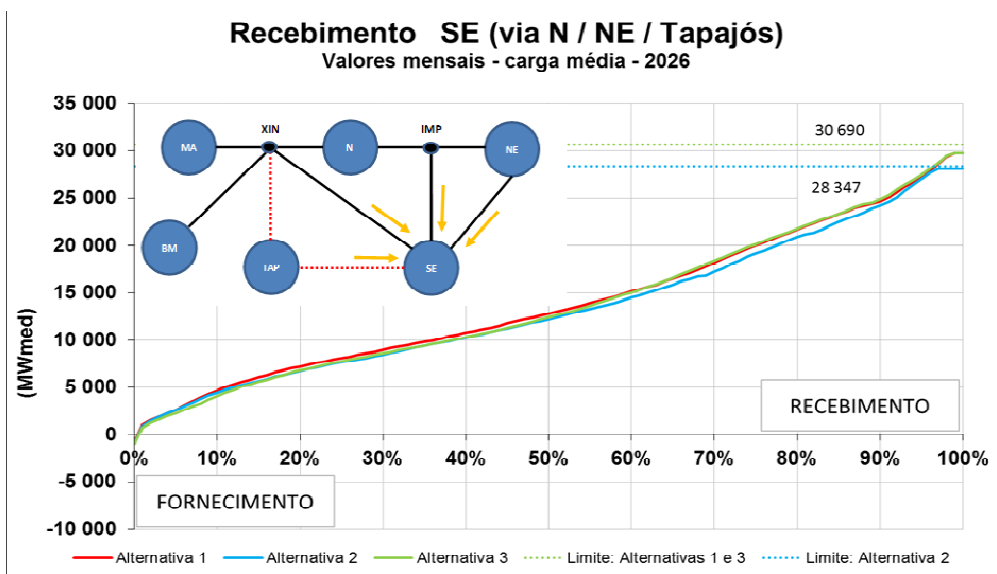


Figura 10 - Fluxo de Recebimento/Fornecimento de Energia pelo Subsistema SE (via Norte/Nordeste/Tapajós)

3.4 Expansão das Interligações

Analisando os resultados apresentados, para cada uma das alternativas estudadas são apontadas as expansões no sistema de transmissão necessárias para assegurar a transferência da energia das usinas do Tapajós para o SIN.

3.4.1 Alternativa 1:

- 13.000 MW: intercâmbio entre os subsistemas Tapajós e Sudeste.

3.4.2 Alternativa 2:

- 13.000 MW: intercâmbio entre os subsistemas Tapajós e Norte;
- 8.600 MW: troncos intermediários que promovem a interligação do nó de Xingú até o Norte;
- 7.800 MW: troncos intermediários que promovem a interligação do Norte até o nó de Imperatriz;
- 9.000 MW: troncos intermediários que promovem a interligação do nó de Imperatriz até o Sudeste, além dos reforços que permitem aumentar a capacidade de recebimento do Sudeste via Norte e Nordeste.

3.4.3 Alternativa 3:

- 13.000 MW: intercâmbio entre os subsistemas Tapajós e Sudeste;
- 2.500 MW: intercâmbio entre os subsistemas Tapajós e Norte;
- 2.000 MW: reforços nos troncos intermediários que promovem a interligação do nó de Xingú até o Norte.

4.0 - CONCLUSÕES

A energia fornecida pelo complexo de usinas do Tapajós é alocada predominantemente na região Sudeste/Centro-Oeste. A máxima alocação média mensal é de 8.000 MWmed no período úmido, existindo cenários nos quais a alocação mensal chega a 12.000 MWmed. Este último valor reflete a geração total das usinas considerando suas respectivas taxas de indisponibilidades – TEIF e IP. Na região Sul, a máxima alocação média mensal é de 2.000 MWmed no período úmido. Com relação às regiões Norte e Manaus, a máxima alocação média mensal de energia é de 1.500 MWmed no período seco. Adicionalmente, no período úmido, nestas últimas regiões existe 10% de probabilidade de ocorrência de cenários, nos quais a alocação mensal de energia é superior a 2.500 MWmed.

Para o caso da interligação das usinas do Tapajós ao Sudeste/Centro-Oeste diretamente, a capacidade de fornecimento dos intercâmbios a partir da região SE/CO, indicada segundo o PDE 2023, é suficiente para escoar a energia para o N/NE durante o período seco, não havendo necessidade de expansão adicional. Por outro lado, quando a interligação do complexo do Tapajós é realizada somente ao Norte (através do nó de Xingú), é necessária a ampliação da capacidade de recebimento do SE/CO em cerca de 9.000 MWmed para o escoamento adequado de sua produção de energia, além de expansões nas capacidades das linhas de transmissão intermediárias.

Os resultados apresentados neste documento referem-se à avaliação eletroenergética, com base na qual foram determinados os requisitos de intercâmbios entre os subsistemas do SIN para garantir o adequado escoamento das usinas pertencentes ao complexo do Tapajós (Rios Tapajós e Jamanxim). Esta análise subsidiará a avaliação das alternativas de expansão da infraestrutura de transmissão para atendimento dos fluxos energéticos verificados, onde serão feitas as estimativas dos investimentos, bem como incorporados os estudos de viabilidade técnico-econômica associados à cada concepção de expansão da rede de transmissão.

5.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

(1) MME/EPE. Plano Decenal de Expansão de Energia 2023. Brasil.

6.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Renata Nogueira Francisco de Carvalho(*)

Nascida no Rio de Janeiro/RJ, em 9 de fevereiro de 1983.

Mestre em Engenharia Elétrica pela COPPE - UFRJ, Graduada em Engenharia Elétrica pela UFRJ.

Empresa: EPE, desde 2007.

Renato Haddad Simões Machado

Nascido em São Paulo/SP, em 29 de janeiro de 1985.

Mestrado em Engenharia Elétrica pela Coppe-UFRJ. Graduado em Engenharia Elétrica pela UFRJ.

Empresa: EPE, desde 2009.

Glaysson de Mello Muller

Nascido no Rio de Janeiro/RJ, em 19 de Agosto de 1980.

Doutorando em Engenharia Elétrica pela Coppe-UFRJ. Mestrado em Engenharia Elétrica pela Coppe-UFRJ.

Empresa: EPE, desde 2013.

Roney Nakano Vitorino

Nascido em Campinas/SP, em 21 de Abril de 1980.

Mestrado em Engenharia Elétrica pela POLI-USP. Graduado em Engenharia Elétrica pela POLI-USP.

Empresa: EPE, desde 2013.

Simone Quaresma Brandão

Nascida no Rio de Janeiro/ RJ, em 6 de novembro de 1971

Graduada em Matemática pela Universidade Castelo Branco, Rio de Janeiro – RJ

Empresa: EPE, desde 2009.