



GRUPO DE ESTUDO DE PLANEJAMENTO DE SISTEMAS ELÉTRICOS - GPL

APLICAÇÃO DE UMA METODOLOGIA DE PLANEJAMENTO DA EXPANSÃO INTEGRADA DA GERAÇÃO E TRANSMISSÃO VISANDO A FLEXIBILIDADE DO SISTEMA

TALES BARRETO SILVA(1); CARMEN LUCIA TANCREDO BORGES(2); MARTHA ROSA MARTINS CARVALHO(1); MARIO VEIGA FERRAZ PEREIRA(1); ALESSANDRO SOARES DA SILVA JUNIOR(1); RENATO GUIMARÃES RIBEIRO(3); FELIPE MELO RODRIGUES PSR SOLUCOES E CONSULTORIA EM ENERGIA LTDA. (1); COPPE/UFRJ(2); ISA CTEEP(3)

RESUMO

A penetração de fontes intermitentes demandou aos sistemas elétricos a necessidade de revisão dos modelos de planejamento incluindo a discussão de avaliações de cootimização da expansão do parque de geração e transmissão. A multiplicidade e a velocidade da alteração dos pontos operativos requerem mais flexibilidade para a operação e a consideração de equipamentos flexíveis nas metodologias de planejamento. Este trabalho objetiva a aplicação da metodologia de planejamento da expansão integrada de geração e transmissão no sistema chileno considerando a avaliação de baterias. Como resultado, verificou-se que baterias podem ser equipamentos que prestam serviço de geração e transmissão ao sistema trazendo diminuição do custo operativo.

PALAVRAS-CHAVE

Planejamento da expansão da geração e transmissão, Baterias, Cootimização, Flexibilidade.

1.0 INTRODUÇÃO

O objetivo do planejamento da expansão de sistemas elétricos é planejar um sistema que atenda aos critérios de planejamento, de forma que a oferta de energia e seu transporte consiga atender o crescimento de demanda de energia elétrica previsto. Para isso, o planejamento da expansão identifica os investimentos necessários em infraestrutura em termos de tecnologia, quantidade, custo de implementação, custo operativo, localização e tempo de implantação, que garanta o suprimento da demanda de energia elétrica ao mínimo custo, além de atender critérios de confiabilidade, contemplando políticas energéticas e ambientais.

A penetração de fontes de geração intermitentes, nas últimas décadas, nas matrizes elétricas adicionou complexidade ao problema do planejamento da expansão devido ao aumento da incerteza inerente à natureza de geração destas fontes de geração. Além disso, pelo possível problema de decisão em relação à disponibilidade de recursos primários versus localização da demanda a ser atendida, as metodologias tradicionais de planejamento da expansão podem não explorar os benefícios de uma análise conjunta entre os segmentos de geração e transmissão na expansão do sistema elétrico.

O presente trabalho tem como objetivo aplicar uma metodologia de planejamento da expansão integrada dos segmentos de geração e transmissão, considerando tecnologias não convencionais de armazenamento (baterias) para fornecer flexibilidade para o sistema. Isto significa realizar o planejamento da expansão do sistema elétrico, analisando simultaneamente a expansão do parque de geração e transmissão para o atendimento da demanda de energia elétrica, considerando equipamentos de tecnologia de armazenamento não convencionais (baterias), múltiplos cenários de vazões e de produção de energia proveniente de fontes intermitentes, discretização temporal horária, diversas opções de investimento em diferentes alocações na rede de transmissão. A solução deste planejamento da expansão, formulado através de um problema de Programação Linear Inteira Mista, é obtida utilizando técnicas de cootimização onde os problemas de investimento e operação são resolvidos simultaneamente, ou seja, ao mínimo custo total de: custo de investimento, valor esperado do custo de operação, custos de violações de restrições operativas e custo de déficit, sujeito a diversas restrições operativas. Para tal utiliza-se ferramentas computacionais aplicadas à expansão dos sistemas elétricos.

2.0 METODOLOGIA

A metodologia de planejamento de geração e transmissão, através da cootimização dos segmentos tem como objetivo avaliar o impacto no planejamento do sistema integrado considerando a inserção de equipamentos que tragam flexibilidade à operação do sistema elétrico, tais como as baterias, como candidatos a expansão do sistema. Dessa forma, avalia-se se com a adição desses equipamentos há uma redução dos custos de investimento somados aos custos de operação, uma vez que o tipo de tecnologia de armazenamento pode prestar serviços tanto para o sistema de geração, com suprimento de demanda, quanto para o sistema de transmissão, aliviando congestionamentos.

A metodologia geral utilizada neste trabalho é apresentada na Figura 1, que inclui a sequência de simulações e combinações de utilização de modelos de otimização e despacho. Entretanto, para um melhor entendimento do uso das avaliações, separou-se a metodologia aplicada a casos energéticos e casos eletroenergéticos. Os casos eletroenergéticos correspondem aos casos que possuem uma representação detalhada da rede de transmissão, enquanto os casos energéticos não possuem esta representação, ou seja, todas as análises são realizadas como se todos os elementos do sistema estivessem conectados em uma única barra.

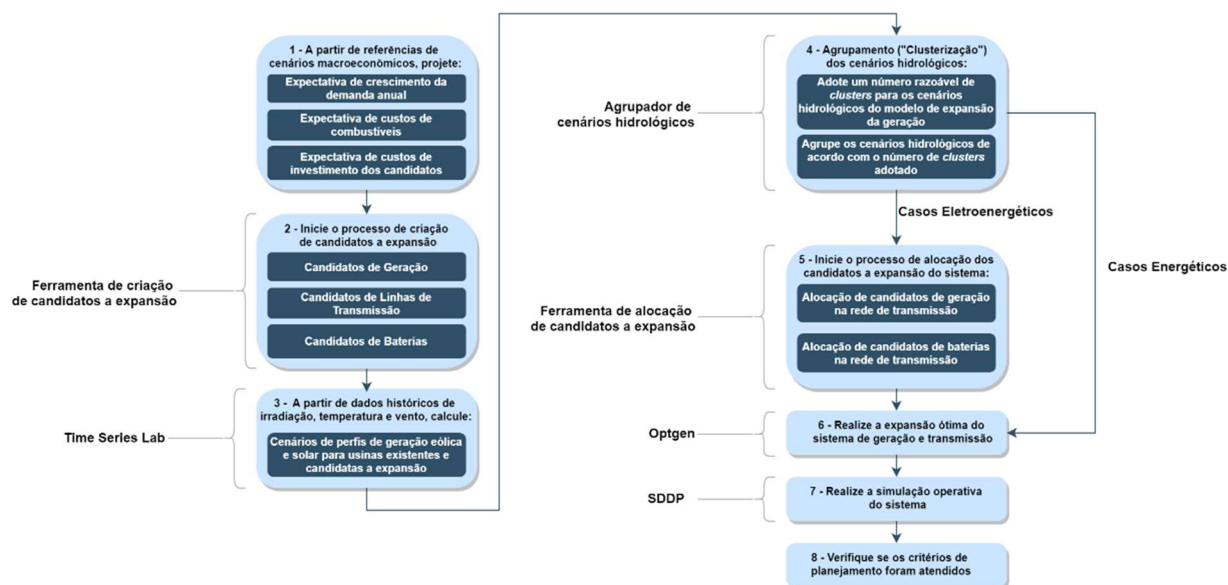


Figura 1 – Metodologia de planejamento.

Metodologia aplicada aos casos energéticos

A metodologia se inicia, no passo 1, com a projeção de crescimento da demanda anual de energia elétrica, custos operativos das térmicas (proveniente dos dados das usinas térmicas e das projeções de custos dos combustíveis) e de custos de investimento de candidatos a expansão, a partir de referências macroeconômicas, que serão utilizados como dados de entrada para a tomada de decisão do modelo de planejamento da expansão do sistema. Em seguida, no passo 2, utiliza-se informações e ferramentas auxiliares para a criação dos candidatos para expansão: geração (térmica, solar e eólica), linhas de transmissão e baterias que serão utilizados como recursos candidatos à expansão para a formação desse novo sistema. Os candidatos de geração e de baterias são criados a partir de premissas de custo de investimento, capacidade, tipo de tecnologia etc. A ferramenta de criação de candidatos de linhas de transmissão consiste em duplicar circuitos existentes previamente selecionados e estimar custos de investimento baseado nos parâmetros das linhas existentes e em uma base de custos de referência.

Considerando a representação detalhada dos perfis de geração das fontes intermitentes (eólica e solar), o passo 3 tem a missão de produzir os múltiplos cenários de geração para essas fontes. Para isso utiliza-se dados climáticos de irradiação, temperatura e vento da região geográfica do sistema elétrico de estudo, que são provenientes da base de dados histórica (MERRA-2) (1), dados de localização das usinas renováveis, das turbinas eólicas (que possuem dados de altura da torre, curvas de geração para cada velocidade de vento etc.) e placas solares (que possuem informações de rastreamento solar, inclinação da placa etc.). Toda essa informação é dado de entrada para a ferramenta computacional Time Series Lab (2) para produzir os múltiplos cenários futuros sintéticos de geração renovável, com discretização horária, para fornecer como dado de entrada para o Optgen (3) no passo 6, para o horizonte de estudo considerado.

Devido a necessidade de redução do esforço computacional, nesta metodologia é utilizado o agrupamento de cenários hidrológicos através do algoritmo *k-medoids* (4), no passo 4. O agrupamento consiste em selecionar

cenários representativos dentre os cenários de vazões disponíveis, dado uma premissa de número de agrupamentos de cenários hidrológicos e fornecer estes cenários representativos como dado de entrada para o Optgen.

Em seguida, realiza-se a expansão ótima do sistema através do software Optgen, que é uma ferramenta computacional utilizada para o planejamento da expansão de sistemas elétricos, que visa otimizar o custo de investimento em conjunto com o valor esperado do custo de operação, custos de violações de restrições operativas e custo de déficit, sujeito às restrições de implementação de novos projetos de geração, baterias e linhas de transmissão. O modelo de expansão utiliza técnicas de cootimização em que os problemas de investimento e operação são resolvidos simultaneamente, essa otimização é realizada através da formulação de um problema de Programação Linear Inteira Mista – PLIM (6)(7).

É importante destacar que para a viabilização da cootimização do parque gerador e de transmissão são necessárias algumas simplificações, tais como: (i) utilização de menor número de cenários hidrológicos (processo de agrupamento de cenários), (ii) decomposição do horizonte de decisão de planejamento em sub-horizontes de um ano; (iii) representação de dias e meses em 2 dias típicos e 4 estações, respectivamente, (iv) simplificação da operação de reservatórios de usinas hidrelétricas.

Após a definição do processo de expansão do passo 6 e com as devidas simplificações listadas acima, verifica-se a operação do sistema considerando um maior nível de detalhamento (passo 7). Para isso, é realizada a simulação da operação do sistema utilizando o *software* SDDP (5), contendo uma operação com maior amostragem de séries hidrológicas, operação detalhada dos reservatórios de usinas hidrelétricas e discretização horária de todos os dias e meses do horizonte de estudo. Por fim, sugere-se que seja avaliado se os critérios de planejamento foram atendidos e se as condições operativas estão adequadas, caso estas condicionantes sejam atendidas, o processo finaliza, caso contrário o processo reinicia com as modificações necessárias.

Metodologia aplicada aos casos eletroenergéticos

Como deseja-se realizar o planejamento da expansão do sistema considerando a representação da rede de transmissão, os casos eletroenergéticos necessitam de um passo adicional, o passo 5, em que se realiza a alocação dos candidatos a expansão nas barras da rede de transmissão dos casos eletroenergéticos. A opção mais robusta é criar cada tipo de candidato para cada barra do sistema, todavia a natureza combinatória do problema da expansão inviabilizaria a solução do problema em um tempo hábil. Portanto, heurísticas de alocação e criação de candidatos são utilizadas através de ferramentas auxiliares. Tais ferramentas auxiliares buscam encontrar os pontos de conexão da rede de transmissão mais interessantes para a alocação dos candidatos de geração e de baterias e de criação de candidatos de transmissão. Esta alocação também é um dado de entrada para o Optgen, em que ao realizar a tomada de decisão de investimento dos candidatos a expansão, irá considerar o ponto de conexão do candidato.

Os candidatos de geração são alocados na rede de transmissão em um número satisfatório para a resolução ótima da expansão do sistema. Os candidatos de linhas de transmissão são alocados conforme a seleção dos circuitos a serem duplicados no momento da criação destes candidatos. Já a ferramenta de criação de candidatos de baterias visa encontrar os melhores pontos da rede de transmissão, observando os custos marginais por barra de uma simulação operativa do sistema elétrico, e para cada barra, tipo de bateria, cenário e dia, irá resolver um problema de programação linear em que a função objetivo é a maximização da receita de operação da bateria, sujeito à algumas restrições.

Similarmente aos casos energéticos, é realizado a expansão ótima do sistema pelo Optgen em que há a tomada de decisão de quantos e quais equipamentos de geração, transmissão e/ou baterias serão inseridos no sistema (passo 6), e por fim, simula-se a operação do sistema (passo 7) com a expansão do sistema definido no passo 6 utilizando o *software* SDDP (5).

3.0 CASO DE ESTUDO

Utilizou-se o sistema elétrico do Chile (8) para a aplicação da metodologia descrita acima. O sistema Chileno possui uma grande participação de geração térmica e hidrelétrica em sua matriz energética, esta característica sofrerá modificações com o descomissionamento de usinas térmicas a carvão e com a grande penetração de usinas solares, que se encontram em uma localização distante do centro de carga devido ao potencial solar da região Norte do Chile. O sistema do Chile possui um sistema de transmissão em que a Rede Básica corresponde aos níveis de tensão de 220 kV e 500 kV, com grandes características de um sistema radial, devido à geografia do país, que podem ocasionar em gargalos de fluxo de potência com a expansão de geração predominante no Norte do país. Devido as características apresentadas relacionadas a necessidade de flexibilidade operativa, escolheu-se o sistema elétrico do Chile para a aplicação da metodologia.

3.1 Premissas

O sistema elétrico do Chile possui cerca de 25,5 GW de capacidade instalada de geração em 2020 (8), possuindo uma predominância de geração térmica composta por diversos combustíveis: Diesel (3,4 GW), Carvão (4,8 GW), Gás Natural (4,5 GW), Óleo Combustível (143 MW), Biogás (65 MW) e Biomassa (542 MW), totalizando 53% da matriz energética (13,5 GW). Nota-se também uma significativa participação de 6,8 GW (27%) de capacidade instalada de usinas hidrelétricas, e cerca de 5,2 GW (20%) de capacidade instalada proveniente de fontes de geração não controláveis, sendo 3,0 GW (11,9%) de solar e 2,1 GW (8,3%) de eólica. Além disso, nas bases são considerados a expansão que está sendo implementada no período de 2020 a 2025, com entrada de cerca de 6 GW de geração, sendo a maior parte solar e eólica. Também é considerado o descomissionamento de 1,7 GW de geração térmica a carvão no mesmo período.

Adota-se a premissa de custo decrescente para a projeção destes custos no ano de 2030. Os candidatos de usinas eólicas e solares possuem os valores de 1122 \$/kW e 606 \$/kW, respectivamente, de custo de investimento em 2030. O custo de investimento das baterias possui um grande decréscimo em seu valor, que possuía um valor de 1.520 \$/kW em 2019 e atinge um valor de 300 \$/kW em 2030 (9). Os candidatos de linhas de transmissão possuem valores de 2.6 M\$ até 80 M\$ de custo de investimento, que estão relacionados à infraestrutura, capacidade, nível de tensão etc. de cada um dos 68 candidatos. Por fim, vale mencionar que os candidatos de geração térmica possuem custos de investimento entre 510 \$/kW a 872 \$/kW.

3.1 Simulações de estudo

A fim de verificar os reais benefícios dos candidatos de geração, transmissão e baterias na expansão do sistema, realiza-se o planejamento da expansão de quatro casos com diferentes representações da rede de transmissão e seleções de candidatos a expansão. A Figura 2 apresenta os casos executados e suas diferenças entre si. Vale mencionar que cada caso contempla a metodologia apresentada na Figura 1.

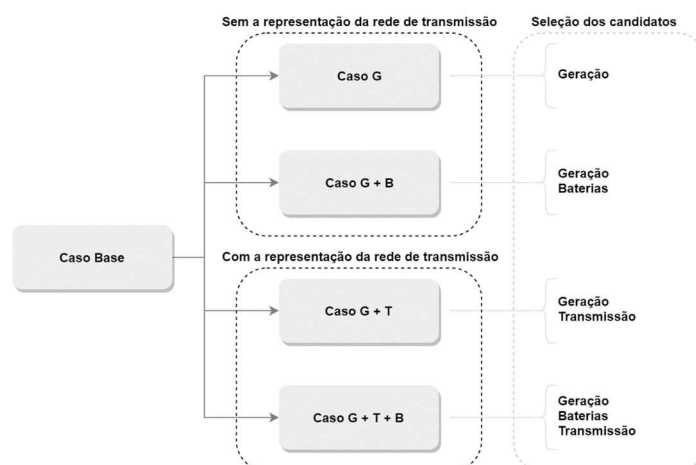


Figura 2 – Diferenças entre os casos de estudo.

A partir de um caso em comum (Caso Base) realiza-se modificações da representação da rede de transmissão e da seleção dos candidatos à expansão dando origem aos casos de estudo. Os casos foram nomeados de acordo com a seleção dos candidatos à expansão que cada caso possui. Logo, o 'Caso G' possui somente candidatos de geração, enquanto o 'Caso G + B' possui candidatos de geração e baterias, o 'Caso G+T', possui candidatos de geração e linhas de transmissão, e por fim, o 'Caso G+T+B', possui candidatos de geração, linhas de transmissão e baterias. Os casos 'Caso G + T' e 'Caso G + T + B' diferem-se também por possuírem a representação da rede de transmissão, enquanto os casos 'Caso G' e 'Caso G + B' não possuem esta representação.

Os resultados dos casos energéticos ('Caso G' e 'Caso G+B') têm o objetivo de analisar as baterias na dinâmica de decisão do modelo de planejamento da expansão, e as consequências operativas desta tecnologia em conjunto com as fontes de geração existente e expandida no sistema em um aspecto puramente energético. Os resultados dos casos eletroenergéticos ('Caso G+T' e 'Caso G+T+B') têm o objetivo de analisar a dinâmica de expansão dos candidatos de geração, transmissão e baterias considerando a sua alocação na rede de transmissão e as possíveis restrições operativas impostas pela rede de transmissão.

A heurística de alocação dos candidatos de baterias na rede do sistema necessita da informação de custo marginal por barra do sistema de uma simulação operativa do sistema com a representação da rede de transmissão. Por este motivo existe uma sequência das simulações dos casos de estudo. Assim, o 'Caso G+T+B' utiliza os resultados de custo marginal por barra da simulação operativa do 'Caso G+T' para realizar a alocação dos candidatos de baterias.

Vale mencionar que, excetuando a seleção dos candidatos e a representação da rede de transmissão, todos os casos recebem os mesmos dados de entrada necessários (cenários de vazões e de geração renovável, custos de investimento, crescimento da demanda etc.) para a realização da execução dos modelos.

3.2 Resultados

Esta seção apresenta e discute os resultados obtidos segundo a metodologia descrita anteriormente, avaliando os resultados entre os casos simulados: custos totais (custo de operação, custo de déficit e soma dos custos de investimento) e tomada de decisão da expansão por tecnologia.

3.2.1 Casos energéticos

Os casos energéticos têm como objetivo avaliar a inserção de baterias para o atendimento da demanda considerando a prestação do serviço de geração. A Figura 3 apresenta o montante de potência instalada de geração renovável e baterias adicionado pelo modelo de planejamento da expansão do sistema no ano de 2030.

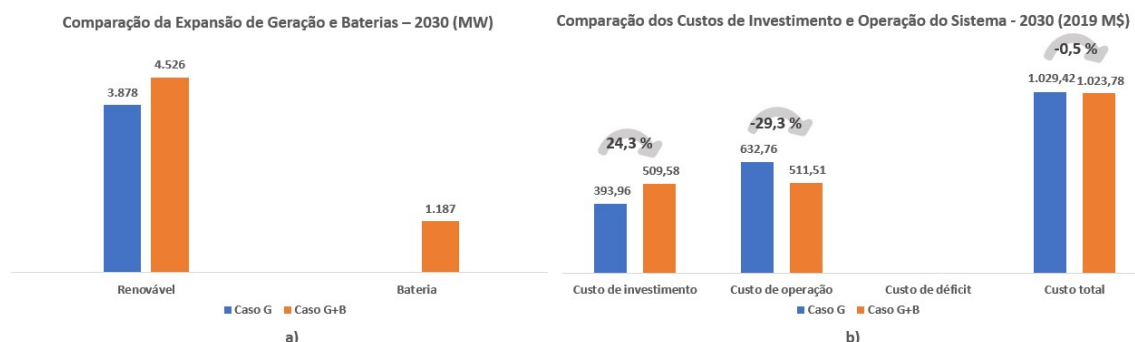


Figura 3 – (a) Expansão de geração e baterias dos casos energéticos; (b) Custos da expansão e operação dos casos energéticos.

Toda a expansão de geração renovável dos casos contidos na Figura 3 corresponde a expansão de fonte de geração solar. Pode-se observar que a seleção de candidatos de baterias do 'Caso G+B' ocasionou na expansão de um montante de 1.187 MW de potência instalada de baterias e isto viabilizou uma maior expansão de geração renovável, uma diferença de 648 MW de potência instalada de geração renovável em comparação com o 'Caso G'. Esse resultado demonstra como as baterias são viabilizadores de energia renovável não despachável, uma vez que otimizam a operação do sistema, podendo armazenar energia nos momentos de abundância de energia de baixo custo e descarregando em momentos de escassez, diminuindo possíveis vertimentos de geração eólica ou solar.

A Figura 3 (b) apresenta os custos de expansão e operação do sistema para os casos energéticos para o ano de 2030. Observa-se que a expansão do 'Caso G+B' ocasiona uma redução de 29,3% do custo operativo do sistema, tal redução possibilitou uma maior expansão de geração solar, além da expansão de baterias, ocasionando um aumento de 24,3% do custo de investimento da expansão, de tal forma que o custo total do 'Caso G+B' é 0,5% menor que o custo total do 'Caso G', que corresponde a uma redução de 5,3 M\$ referenciados ao ano de 2019.

Os resultados da simulação operativa demonstram os benefícios da consideração conjunta de candidatos de geração e baterias no planejamento da expansão. A Figura 4 (b) apresenta o perfil horário de geração do mês de outubro de 2030 para o 'Caso G+B', em que é possível observar o carregamento das baterias nos horários de maior geração solar, e o descarregamento nas demais horas. Isto ocasiona na substituição da geração de fontes mais caras por fontes de geração solar que possuem custo de operação nulo, reduzindo assim o custo operativo do sistema.

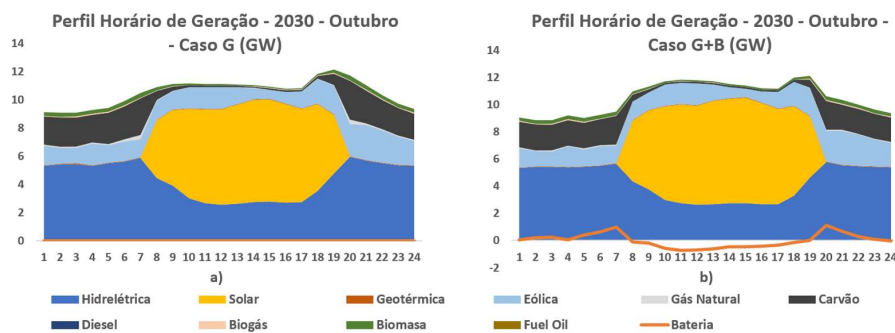


Figura 4 – (a) Perfil horário de geração do mês de outubro de 2030 do Caso G; (b) Perfil horário de geração do mês de outubro de 2030 do Caso G+B.

A Figura 5 (b) apresenta o perfil horário do custo marginal de demanda do mês de outubro de 2030 do 'Caso G+B', em que nota-se uma significativa redução dos custos operativos em comparação com o resultado do 'Caso G' da Figura 5 (a).

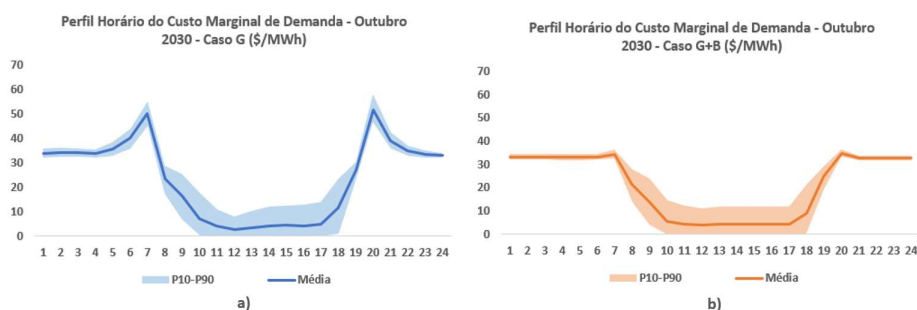


Figura 5 – (a) Perfil horário do custo marginal de demanda do mês de outubro de 2030 do 'Caso G'; (b) Perfil horário do custo marginal de demanda do mês de outubro de 2030 do 'Caso G+B'.

3.2.2 Casos eletroenergéticos

A Figura 6 (a) apresenta o montante de potência instalada de geração renovável e baterias adicionado pelo modelo de planejamento da expansão do sistema no ano de 2030, para o 'Caso G+T' e 'Caso G+T+B'.

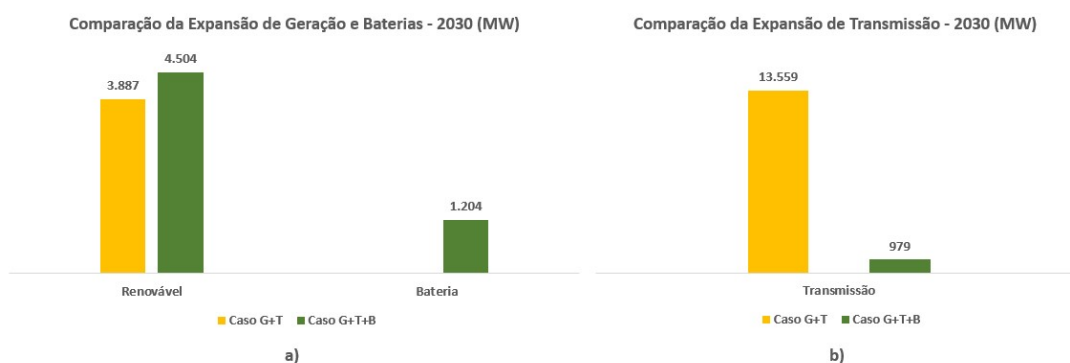


Figura 6 – a) Expansão de geração e baterias dos casos eletroenergéticos. b) Expansão de transmissão dos casos eletroenergéticos

Nota-se que a seleção dos candidatos de baterias no planejamento da expansão do sistema do 'Caso G+T+B' viabilizou uma maior expansão de geração renovável. No 'Caso G+T+B' houve uma diferença de 617 MW de potência instalada de geração renovável expandida proporcionado pela expansão das baterias. Vale mencionar que toda expansão de geração renovável de ambos os casos corresponde às fontes de geração solar.

A Figura 6 (b) apresenta a expansão de transmissão dos casos eletroenergéticos. O 'Caso G+T' possui uma expansão de doze linhas de transmissão (5 em 220 kV e 7 em 500 kV) e quatro transformadores de 750 MW (220/500 kV), resultando em um montante de 13.559 MW. Já o 'Caso G+T+B' resultou em uma expansão de um montante de 979 MW de capacidade, que corresponde à quatro linhas de transmissão de nível de tensão de 220 kV.

É notável a diferença da expansão de transmissão entre os casos, este resultado demonstra o impacto das baterias na expansão do segmento de transmissão. As baterias otimizam a operação do sistema e podem cumprir a função de postergar a expansão de transmissão. Por exemplo, a bateria pode armazenar energia em momentos de excesso de energia, para utilizar em momentos de alta demanda de energia, diminuindo o pico da demanda, evitando assim a expansão de transmissão. Entretanto, o aumento de demanda e geração no sistema em algum momento requisitará a expansão do sistema de transmissão¹. Este resultado também justifica a necessidade da análise conjunta dos diversos elementos candidatos a expansão do sistema para minimizar os custos relacionados ao custo de implementação e operação das tecnologias do sistema elétrico.

A Figura 7 apresenta os custos de investimento, operação e déficit calculados pelo modelo de planejamento da expansão do sistema dos casos eletroenergéticos para o ano de 2030.

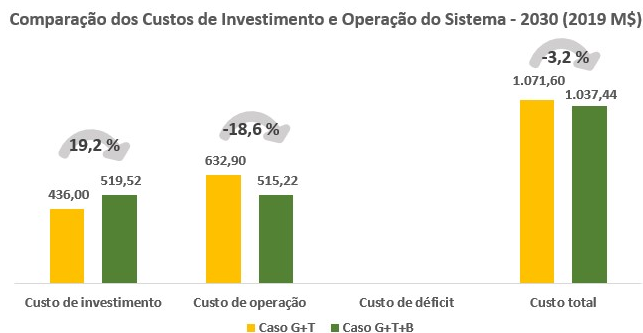


Figura 7 - Custos da expansão e operação dos casos eletroenergéticos.

Apesar da redução da expansão do segmento da transmissão do 'Caso G+T+B', este caso resultou em uma maior expansão do segmento de geração, além da expansão das baterias, que resultou em um custo 19,2% maior que o custo de investimento do 'Caso G+T'. Contudo, a consideração das baterias na decisão do modelo de planejamento da expansão no 'Caso G+T+B' proporcionou a expansão da geração, transmissão e baterias que resulta em um custo operativo 18,6% menor que o custo operativo do 'Caso G+T'. Tal expansão resultou em uma redução de 3,2% em relação ao 'Caso G+T'.

Similarmente ao caso energético, a Figura 8 apresenta o carregamento das baterias nas horas de maior disponibilidade de geração solar e o descarregamento nas demais horas do dia, substituindo a geração de maior custo por fontes de geração de custo operativo nulo.

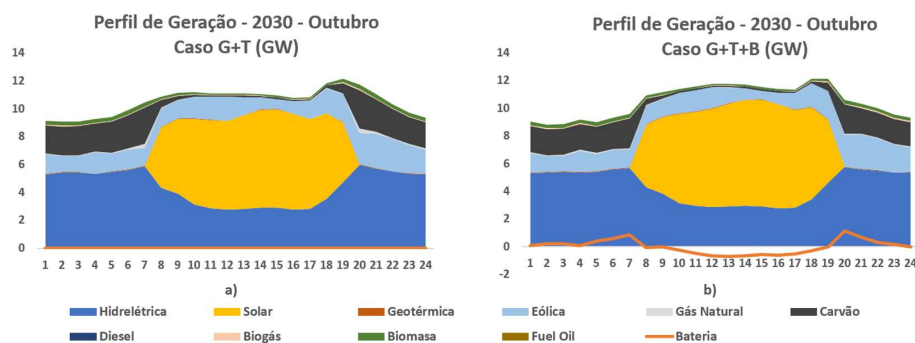


Figura 8 - (a) Perfil horário de geração do mês de outubro de 2030 do Caso G+T; (b) Perfil horário de geração do mês de outubro de 2030 do Caso G+T+B.

Na Figura 9 (b) destaca-se novamente que a diminuição dos custos operativos que se dá pela inserção de geração de fontes que possuem custo de operação nulo, como visto nos resultados anteriores, e isso ocorre mesmo com a presença das restrições que a rede de transmissão impõe.

¹ Esta avaliação não foi realizada nesse trabalho por não ser objeto do estudo.

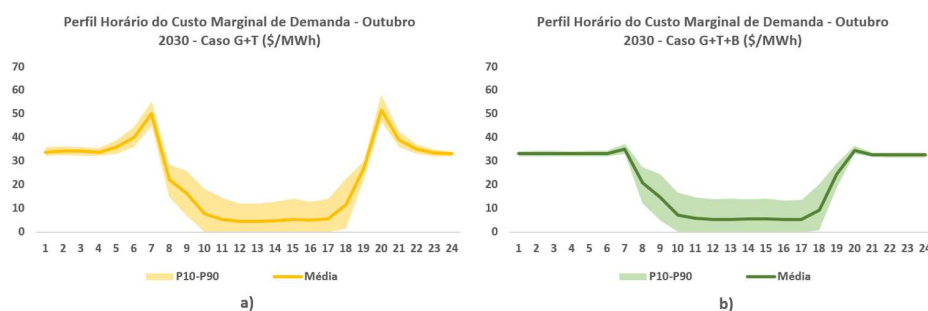


Figura 9 - (a) Perfil horário do custo marginal de demanda do mês de outubro de 2030 do Caso G+T; (b) Perfil horário do custo marginal de demanda do mês de outubro de 2030 do Caso G+T+B.

4.0 CONCLUSÕES

Na fase do planejamento da expansão dos casos energéticos observou-se que a consideração das baterias viabilizou uma maior expansão de geração solar, ocasionando em um maior custo de investimento, mas possibilitou uma redução dos custos operativos do sistema de tal forma que o custo total (soma do custo de investimento e custo de operação) do 'Caso G+B' foi 0,5% menor em relação ao 'Caso G'.

A consideração das baterias no planejamento da expansão do sistema dos casos eletroenergéticos, além de viabilizar uma maior expansão de geração solar, diminuiu a expansão de transmissão significativamente. Similarmente aos casos energéticos, apesar do aumento do custo de investimento devido a expansão de baterias e maior expansão de geração solar, as baterias proporcionaram um menor custo de operação de modo que o custo total do 'Caso G+T+B' foi 3,2% menor em relação ao 'Caso G+T'.

Dado que o horizonte de planejamento geralmente é de 10 a 40 anos, a redução obtida dos custos totais da expansão do sistema é significativa, uma vez que a análise aqui realizada é para um ano do horizonte de planejamento. Assim, a aplicação da metodologia de planejamento da expansão de forma integrada pode resultar em maiores reduções de custos em relação à metodologia tradicional de planejamento, ao ser utilizada em um maior horizonte de planejamento.

Os resultados mostraram que a consideração das baterias no planejamento da expansão do sistema é benéfica para o sistema, pois viabiliza uma maior expansão de geração solar a um custo total menor. Tal fato pode ser justificado pelas baterias apresentarem uma flexibilidade operativa ao poderem armazenar energia nos horários de excesso de geração solar, que é uma energia de baixo custo, para utilizar nos momentos de escassez de geração solar, substituindo uma geração de maior custo. Desta forma, pode-se evitar o vertimento de geração solar e permite utilizar a energia proveniente desta fonte mesmo nos horários em que não se possui o recurso primário (irradiação).

Portanto, a metodologia de planejamento integrado do sistema elétrico, considerando simultaneamente os segmentos de geração e transmissão, além das baterias como equipamentos de flexibilidade, apresentada e implementada neste trabalho se mostrou bastante efetiva para a minimização dos custos da expansão e operação dos sistemas elétricos.

Conclui-se também que os resultados de flexibilidade das baterias são independentes da representação da rede de transmissão. Contudo, os resultados da expansão dos casos eletroenergéticos mostraram que a expansão em baterias postergou investimentos no segmento de transmissão. Por fim, vale mencionar que o resultado do planejamento da expansão é uma resposta a característica de cada caso de estudo. Portanto, os resultados aqui encontrados são correspondentes ao caso de estudo, porém a metodologia pode ser aplicada a diversos sistemas elétricos.

5.0 AGRADECIMENTOS

Agradecimentos: à ISA CTEEP, como proponente do Projeto de P&D "Planejamento Integrado e Flexível de Sistemas de Transmissão" (PD 0068-48/2020 do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento da Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL), tendo como Executoras as empresas: PSR, HPPA e MRTS Consultoria, com cooperação técnico-científica com a Empresa de Pesquisa Energética (EPE).

6.0 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) NASA. "Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications, Version 2 (MERRA-2)". Disponível em: <<https://gmao.gsfc.nasa.gov/reanalysis/MERRA-2/>>.
- (2) PSR. "Time Series Lab". Disponível em: <<https://www.psr-inc.com/software/?current=p13880>>.
- (3) PSR. "PSR Optgen". Disponível em: <<http://www.psr-inc.com/software-en/?current=p4040>>.
- (4) Kaufman, L. and Rousseeuw, P.J. (1990). Partitioning Around Medoids (Program PAM). In Finding Groups in Data (eds L. Kaufman and P.J. Rousseeuw). <https://doi.org/10.1002/9780470316801.ch2>
- (5) PSR. "Stochastic Dual Dynamic Programming (SDDP)". Disponível em: <<https://www.psr-inc.com/software/?current=p4026>>.
- (6) SOARES, A., PEREZ, R., THOMÉ, F. Optimal Generation and Transmission Expansion Planning Addressing Short-Term Constraints with Cooptimization of Energy and Reserves.
- (7) PSR. "Optgen - User manual". Disponível em: <<http://www.psr-inc.com/software-en/?current=p4040>>.
- (8) COORDINADOR ELÉCTRICO NACIONAL. Disponível em: <<https://www.coordinador.cl/sistema-electrico/>>. Acesso em: 18/11/2020.
- (9) COLE, W., FRAZIER, A. W. *Cost Projections for Utility-Scale Battery Storage*. Relatório Técnico NREL/TP-6A20-73222, National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO, 2019. Disponível em: <<https://www.nrel.gov/docs/fy19osti/73222.pdf>>. Acesso em: 16/09/2020.

DADOS BIOGRÁFICOS



É formado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). Ingressou na PSR em janeiro de 2019 na equipe de Transmissão e Distribuição. Atua em estudos de planejamento da expansão integrada dos segmentos de geração, transmissão e distribuição, projeção de Tarifas de Uso do Sistema de Transmissão (TUST), assessoria regulatória a investidores nacionais e internacionais interessados na aquisição de ativos de geração, transmissão e distribuição no Brasil. Além disso, dentre as suas atividades destaca-se também a análise eletroenergética de sistemas de grande porte, como Brasil, Chile, Costa Rica e México.

(2) CARMEN LUCIA TANCREDO BORGES
Graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade do Estado do Rio de Janeiro (1984), mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (1991) e doutorado em Engenharia de Sistemas e Computação pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (1998). Professor Titular da Universidade Federal do Rio de Janeiro, na pós-graduação da COPPE e na graduação da Escola Politécnica. Especialista em Sistemas de Potência atuando principalmente nas seguintes áreas: Análise, Simulação e Otimização, Confiabilidade, Geração Distribuída, Fontes Alternativas, Sistemas Inteligentes e Processamento de Alto Desempenho.

(3) MARTHA ROSA MARTINS CARVALHO
Martha Rosa Carvalho é formada em engenharia elétrica, com ênfase em Sistemas de Potência pela Universidade Federal Fluminense (UFF), Mestre pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) e atualmente cursa doutorado na mesma instituição na área de Sistemas de Energia. Ingressou na PSR em 2008 na área de planejamento do sistema elétrico brasileiro, atuando nas áreas de geração e transmissão. Atualmente, Martha é gerente da área de estudos de transmissão, distribuição de energia atuando nos estudos técnicos, regulatórios e econômicos integrados da área.

(4) MARIO VEIGA FERRAZ PEREIRA
Mario Veiga é fundador da PSR. Foi dos principais conselheiros governamentais na crise energética de 2001 e na formulação dos leilões de contratação de energia. Desenvolveu algoritmos que são referência mundial, como a programação dinâmica dual estocástica (SDDP). É Fellow do IEEE; membro eleito da US National Academy of Engineering, da Academia Brasileira de Ciências e da Academia Nacional de Engenharia; recebeu a Medalha Presidencial do Rio Branco por sua contribuição ao setor elétrico brasileiro; a Medalha Nacional de Mérito Científico e o Prêmio Franz Edelman Management Science Achievement. É autor de cinco livros e 250 artigos em periódicos internacionais.

(5) ALESSANDRO SOARES DA SILVA JUNIOR
Engenheiro na PSR desde 2017. Atua como coordenador de desenvolvimento de metodologias e modelos nas áreas de expansão da geração (co-otimização de investimentos, custos operativos e da reserva probabilística dinâmica –

OptGen); geração probabilística de cenários de produção horária de recursos renováveis como plantas eólicas, solar fotovoltaica e CSP, combinando informações de modelos globais de reanálise com modelos de séries temporais não lineares (Time Series Lab); e análise do impacto das mudanças climáticas nos sistemas elétricos. Graduado em Engenharia Elétrica e Engenharia de Controle pela PUC-Rio e Mestre em Otimização / Pesquisa Operacional pela mesma universidade.

(6) RENATO GUIMARÃES RIBEIRO
Engenheiro Eletricista com ênfase em Sistema de Potência formado na Universidade Federal de Itajubá (2005) e especialista em Sistemas de Energia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Catarina (2012), trabalha há 14 anos na Companhia de Transmissão de Energia Elétrica Paulista - ISA CTEEP, atualmente coordenando a área de Planejamento da Expansão e Estudos.

(7) FELIPE MELO RODRIGUES
Graduado em Engenharia Elétrica - Ênfase em Energia e Automação pela Universidade de São Paulo (2013). Atualmente é Engenheiro Sr de Planejamento da Expansão da Companhia de Transmissão de Energia Elétrica Paulista. Tem experiência na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em Sistemas Elétricos de Potência.