



## **ESTUDO COMPARATIVO DO PLANEJAMENTO INTEGRADO E HIERÁRQUICO DA EXPANSÃO DA GERAÇÃO E TRANSMISSÃO CONSIDERANDO PERDAS NA TRANSMISSÃO**

**Guilherme Costa Silva, Lucas S. M. Guedes**

Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica - Universidade Federal de Minas Gerais  
Av. Antônio Carlos 6627, 31270-901, Belo Horizonte, MG, Brasil  
guicosta@ufmg.br, lucasguedes1510@gmail.com

**Adriano C. Lisboa**

Gaia Solutions on Demand  
Rua Professor José Vieira Mendonça, 770, 31270-901, Belo Horizonte, MG, Brasil  
adriano.lisboa@gaiasd.com

**Douglas A. G. Vieira**

Enacom Handcrafted Technologies  
Rua Professor José Vieira Mendonça, 770, 31270-901, Belo Horizonte, MG, Brasil  
douglas.vieira@enacom.com.br

**Rodney R. Saldanha**

Departamento de Engenharia Elétrica - Universidade Federal de Minas Gerais  
Av. Antônio Carlos 6627, 31270-901, Belo Horizonte, MG, Brasil  
rodney@cpdee.ufmg.br

### **RESUMO**

Este trabalho consiste em avaliar duas metodologias de planejamento de expansão conjunta de geração e de transmissão, pelo qual é proposta a inserção de novas usinas e novas linhas de transmissão. A abordagem hierárquica consiste em resolver as tarefas de geração e de transmissão em etapas, enquanto a abordagem integrada trata as duas tarefas simultaneamente. Um estudo comparativo entre as abordagens considerando perdas de transmissão é realizado usando o sistema elétrico Garver de 6 barras, avaliando a solução obtida e o custo mínimo em cada abordagem.

**PALAVRAS CHAVE.** Planejamento de Expansão da Geração e da Transmissão, Sistemas Elétricos de Potência, Programação Linear.

**Tópicos:** PO na Área de Energia, Simulação, Teoria e Algoritmos em Grafos

### **ABSTRACT**

This paper consists of an evaluation of two methodologies of composite generation and transmission expansion planning, in which new plants and transmission lines are inserted. The hierarchical approach consists of solving generation and transmission tasks in phases, while integrated approach treats both tasks simultaneously. A comparative study between both approaches considering transmission losses is proposed using Garver 6-bus system, evaluating the obtained solution and minimum cost from each approach.

**KEYWORDS.** Generation and Transmission Expansion Planning. Power Systems. Linear Programming.

**Paper Topics:** OR in Energy, Simulation, Theory and Algorithms in Graphs.



## 1. Introdução

O planejamento de expansão de um sistema de potência tem como objetivo atender a uma crescente demanda de energia e expandir a rede elétrica, provendo maior confiabilidade e um fornecimento de energia mais amplo. Este problema envolve duas etapas de destaque, ambas caracterizadas como um problema de otimização não linear, restrito, discreto, e podem envolver vários objetivos ou restrições.

Um dos problemas, o planejamento da expansão da geração, consiste em identificar o melhor plano de expansão, determinando as unidades geradoras a serem construídas e sua disponibilidade, considerando um planejamento de longo prazo, minimizando todos os custos implícitos ao planejamento e solucionando algumas restrições tais como, confiabilidade, tipo de plantas, emissão de combustível, dentre outros fatores definidos em [Hemmati et al., 2013].

O planejamento de expansão da transmissão consiste na definição de novas linhas ou subestações que deverão ser instaladas na rede elétrica, a fim de proporcionar um nível adequado de fornecimento de energia aos consumidores [Hemmati et al., 2013]. Ambos os problemas têm alguns aspectos em comum e também podem ser estudados e avaliados de forma conjunta. Além disso, tais abordagens são mutualmente complementares e oferecem contribuições mútuas.

Neste trabalho, será apresentado um modelo simples de programação linear para o planejamento conjunto de expansão da geração e transmissão. Neste contexto, duas abordagens são consideradas: a abordagem hierárquica, na qual a expansão da geração é solucionada antes da transmissão, e a abordagem integrada, onde a expansão da geração e da transmissão são realizadas simultaneamente.

O objetivo deste estudo é verificar qual das duas abordagens oferece resultados mais interessantes, considerando os custos de implantação e de manutenção e outros fatores, como perdas de transmissão e flexibilidade no custo da geração no caso hierárquico, dentre outros aspectos.

Nota-se que o estudo não é tão recente, porém, considerando os aspectos de perdas na transmissão e a simplicidade do modelo proposto, o presente estudo busca resolver exatamente as questões apresentadas ao longo do trabalho, de forma a determinar qual metodologia é a mais indicada em tais condições.

## 2. Planejamento da Expansão de Sistemas Elétricos

O planejamento da expansão de um sistema elétrico de potência envolve duas etapas de destaque: a expansão da geração, que consiste em introduzir novas usinas, e a expansão da transmissão, que consiste na introdução de novas linhas de transmissão ao sistema. Tal planejamento deve minimizar os custos, referentes à instalação e manutenção das usinas e das linhas, buscando o atendimento da demanda de energia futura com confiabilidade. Na literatura, esses problemas podem ser abordados separadamente ou de forma conjunta, provendo pontos de vista diferentes sobre a expansão do sistema.

Existem duas abordagens conjuntas: uma delas consiste em um método hierárquico, onde o problema da expansão da geração é resolvido, e em seguida, resolve-se a expansão da transmissão. Já a abordagem integrada considera ambos os problemas de expansão em uma mesma formulação de otimização.

Um exemplo de aplicação é estudado em [Alizadeh and Jadi., 2015], onde os problemas de expansão são aplicados com base em formulações estáticas e em um contexto dinâmico. Técnicas de programação não linear e de decomposição foram aplicadas em estudos de casos como o sistema de 6 barras da Garver e o sistema IEEE de 30 barras.

Um estudo sobre abordagem composta de expansão da geração e da transmissão de sistemas é realizado em [Saboori et al., 2011], com base em variabilidade dos recursos de energia eólica e na busca de um planejamento ótimo de expansão, de acordo com os impactos implícitos ao modelo. A abordagem integrada é aplicada aos sistemas da Garver e o IEEE de 24 barras.

As comparações entre as abordagens são estudadas em [You et al., 2016], neste trabalho, que também realiza uma revisão nas metodologias, considera diferentes modelos, como o de cor-



rente alternada, corrente contínua e fluxo de rede, e a co-otimização de duas abordagens conjuntas de expansão da geração e transmissão, além de incertezas no modelo.

Em [Thomé et al., 2013], as abordagens de planejamento são estudadas em termos da decomposição de Benders com avaliação de multiplicadores de Lagrange associados às restrições do modelo. O modelo é aplicado no estudo de caso do sistema colombiano considerando usinas térmicas e hidrelétricas. Os resultados apresentaram baixos custos de investimentos para a abordagem integrada e baixos custos de operação para a hierárquica.

O modelo estudado em [Sharan and Balasubramanian, 2012] inclui restrições de disponibilidade e transporte de combustíveis, leis de Kirchoff, e taxa de aquecimento das usinas térmicas. Os resultados do estudo, aplicado a um sistema elétrico indiano, indicam que a abordagem integrada apresentou um custo menor que a abordagem sequencial considerando o planejamento da geração seguido da transmissão.

O planejamento de sistemas possui também alguns estudos que consideram o mercado de energia, como o estudo realizado em [Javadi and Saniei, 2011] que define a formulação do planejamento de longo prazo em um ambiente de mercado competitivo buscando maximização do lucro de concessionárias. O modelo emprega técnicas de teoria de jogos com a otimização baseada em programação não linear inteira.

No Brasil, a Empresa de Pesquisa Energética (EPE) é responsável pelos estudos de expansão do sistema. De acordo com a metodologia do plano decenal de expansão de energia (PDE) em [PDE 2015], o planejamento da expansão da geração é realizado antes do planejamento da transmissão, aplicando a metodologia hierárquica. O estudo da geração é realizado com o NEWAVE baseado nos equivalentes por sub-sistemas, onde as transmissões internas são desconsideradas, sendo apenas modeladas as interconexões energéticas entre os subsistemas. Essa capacidade de interconexão já prevê a expansão ou antecipação de troncos de transmissão para permitir trocas de energia entre os subsistemas, de modo que todos apresentem condições de suprimento que atendam aos critérios estabelecidos.

Consequentemente, com os resultados dessa primeira etapa, é verificada a necessidade de estudos específicos para viabilizar a expansão da transmissão nos prazos e montantes demandados pelos estudos energéticos. Com o intuito de modelar o impacto das perdas de energia nas linhas de transmissão, uma estimativa das perdas é incorporada nas previsões de carga de energia elétrica dos subsistemas utilizados no NEWAVE.

Na revisão provida em [Saldarriaga-Zuluaga et al., 2016], foi realizado um estudo da arte sobre o modelo de planejamento integrado da geração e transmissão, porém, foram considerados aspectos mercadológicos, com enfoque em um mercado centralizado, no qual duas abordagens eram definidas por este mercado: uma abordagem antecipativa, onde os resultados de mercado são antecipados de forma a definir as linhas de transmissão, esta seria correspondente a uma abordagem hierárquica, uma vez que a geração seria antecipada, e a abordagem integrada, na qual o mercado define usinas e linhas que serão instaladas. O estudo também menciona as técnicas usadas, modelos de redes de transmissão, incertezas, confiabilidade e novas tecnologias, dentre outros aspectos.

Nos estudos analisados, muitas vezes focados em sistemas termonucleares, é possível encontrar resultados comparativos que afirmam haver ganhos na formulação integrada. Entretanto, muitas vezes, os resultados comparativos não deixam claro qual formulação é a mais adequada para a expansão dos sistemas.

A metodologia apresentada neste trabalho busca estudar o planejamento da geração e transmissão considerando as abordagens hierárquica e integrada, de acordo apenas com dados de geração, transmissão, demanda e estimativa de perdas nas linhas, de forma a prover informações sobre as metodologias de planejamento.

### **3. Modelo Simplificado de Expansão**

Um modelo simples de programação linear para o planejamento da geração e transmissão baseado em grafos e no princípio da conservação dos fluxos é apresentado. Neste modelo, cada



nó, que representa subsistemas, possui diferentes fontes de energia como opções de expansão, com custos, capacidade de geração e incertezas na energia disponível. A demanda de energia é definida por nó. As conexões representam os troncos de transmissão, com custos, coeficientes de perda e capacidade de fluxo. A ideia da formulação é preservar os elementos básicos do planejamento.

O método hierárquico, consiste na seguinte formulação: na primeira etapa apenas os parâmetros dos nós são considerados no planejamento da geração com o intuito de modular as informações de custo de transmissão sem detalhar a rede. Uma análise desse parâmetro e metodologias de cálculo são apresentadas neste trabalho. O segundo nível do método hierárquico é a otimização das interconexões.

O método integrado, por sua vez, trata os parâmetros dos nós considerados no planejamento da geração e as conexões do planejamento da transmissão em uma única formulação, considerando seus custos, a demanda, e os coeficientes analisados.

### 3.1. Planejamento integrado

O planejamento integrado da expansão da geração e transmissão é uma abordagem conjunta na qual ambos os problemas são tratados simultaneamente e pode ser formulada como

$$\text{minimizar } \sum_{v=1}^V c_v G_v + \sum_{e=1}^E \bar{c}_e P_e \quad (1)$$

$$\text{s.a. } \sum_{e \in \delta^+(v)} \alpha_e P_e \geq D_v, \quad \forall v \in V \quad (2)$$

$$\sum_{e \in \delta^-(v)} P_e = G_v, \quad \forall v \in V \quad (3)$$

$$0 \leq G_v \leq G_{v\max} \quad (4)$$

$$0 \leq P_e \leq P_{e\max} \quad (5)$$

Onde  $c_v$  é custos relacionados à inserção e manutenção da usina no vértice  $v$ ,  $\bar{c}_e$  é o custo relacionado à linha de transmissão na aresta  $e$ ,  $D_v$  é a demanda no vértice  $v$ ,  $G_v$  é o índice de produção das usinas no vértice  $v$ ,  $P_e$  é o fluxo de transmissão entre os vértices que ligam a na aresta  $e$  e  $\alpha_e$  é um coeficiente de transmissão, associado a perdas referentes ao fluxo entre os vértices pertencente à aresta  $e$ .  $G_{v\max}$  e  $P_{e\max}$  são os limites superiores referentes aos respectivos índices de produção em  $v$  e de fluxo em  $e$ . Há também um coeficiente de disponibilidade  $\beta_v$  associado a cada vértice  $v$ . Entretanto, como este coeficiente é constante, assume-se, portanto, que  $G_v = \beta_v G_v$  nos demais casos.

### 3.2. Planejamento hierárquico

O planejamento hierárquico consiste em resolver a expansão da geração

$$\text{min } \sum_{v=1}^V c_v G_v \quad (6)$$

$$\text{s.a. } \sum_{v=1}^V \beta_v G_v \geq \sum_{v=1}^V D_v \quad (7)$$

$$0 \leq G_v \leq G_{v\max} \quad (8)$$



Tabela 1: Dados do sistema Garver 6 Barras, adaptado de [Kim et al., 2015].

| Geração: |       |            |           |       | Transmissão: |     |       |            |            |
|----------|-------|------------|-----------|-------|--------------|-----|-------|------------|------------|
| $v$      | $C_v$ | $G_{vmax}$ | $\beta_v$ | $D_v$ | $i$          | $j$ | $C_e$ | $P_{emax}$ | $\alpha_e$ |
| 1        | 0.0   | 300        | 0.867     | 80.0  | 1            | 2   | 0.0   | 100.0      | 0.918      |
| 2        | 0.0   | 0          | 0.833     | 98.0  | 4            | 2   | 0.0   | 100.0      | 0.918      |
| 3        | 0.0   | 390        | 0.800     | 85.0  | 5            | 2   | 0.0   | 100.0      | 0.936      |
| 4        | 0.0   | 0          | 0.767     | 92.0  | 2            | 4   | 0.0   | 100.0      | 0.936      |
| 5        | 10.0  | 400        | 0.733     | 77.0  | 3            | 4   | 0.0   | 100.0      | 0.918      |
| 6        | 8.5   | 642        | 0.700     | 67.0  | 5            | 4   | 0.0   | 100.0      | 0.900      |

seguida pelo planejamento da expansão da transmissão, relaxando a geração

$$\min \sum_{v=1}^V c_v G_v + \sum_{e=1}^E \bar{c}_e P_e \quad (9)$$

$$s.a \sum_{e \in \delta^+(v)} \alpha_e P_e \geq D_v, \quad \forall v \in V \quad (10)$$

$$\sum_{e \in \delta^-(v)} P_e = G_v, \quad \forall v \in V \quad (11)$$

$$0 \leq G_v \leq \eta G_v^* \quad (12)$$

$$0 \leq P_e \leq P_{emax} \quad (13)$$

onde  $G^*$  é uma solução do subproblema de expansão da geração (6)-(8) e  $\eta \geq 1$  é um fator de relaxação.

#### 4. Estudo de caso

Neste trabalho, as abordagens de planejamento são testadas em sistemas de *benchmark*, e em seguida comparadas conforme o desempenho e o resultado oferecido pelas abordagens estudadas.

Um exemplo é o sistema de 6 barras de [Garver., 1970], bastante utilizado na literatura em problemas de expansão da transmissão. Neste trabalho será utilizado o sistema modificado estudado em [Kim et al., 2015], no qual adiciona-se um gerador candidato a mais no modelo. Isso permite um estudo mais diversificado da metodologia conjunta de planejamento de expansão do sistema em questão.

##### 4.1 Descrição

O sistema Garver 6 barras é um sistema de *benchmark* que possui seis linhas previamente instaladas, sendo as demais linhas candidatas à implantação no sistema. Dentre as seis barras pertencentes, há uma barra isolada com gerador a ser conectada por algumas das linhas candidatas. O sistema possui três barras com gerador, inclusive a barra isolada.

No sistema modificado, existe um gerador a mais no projeto a ser construído, localizado na Barra #5. Para estudar as metodologias compostas, nas quais realizam a expansão da geração e da transmissão, este sistema foi considerado, uma vez que o modelo original é mais usado para expansão da transmissão.

A descrição completa do sistema Garver 6 Barras é mostrada na Tabela 1 e na Figura 1. Neste trabalho, foram considerados apenas os custos operacionais relativos às usinas e linhas existentes e introduzidas.

A simulação da expansão do sistema Garver 6 Barras possui duas etapas: na primeira, é discutida a análise do sistema expandido, na qual são apresentadas as usinas e linhas de transmissão introduzidas ao sistema, a segunda consiste em avaliar os custos de planejamento de acordo com as

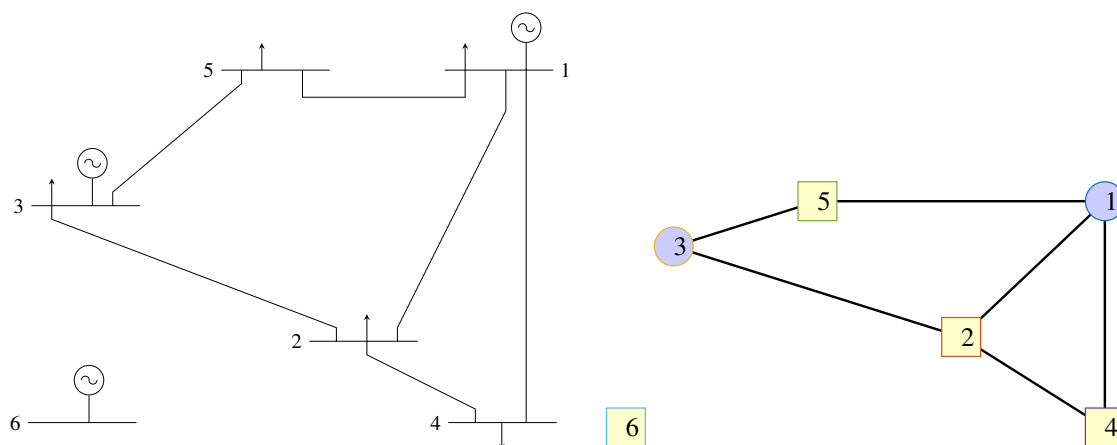


Figura 1: Representação do sistema Garver 6 Barras [Garver., 1970], conforme representações em grafos.

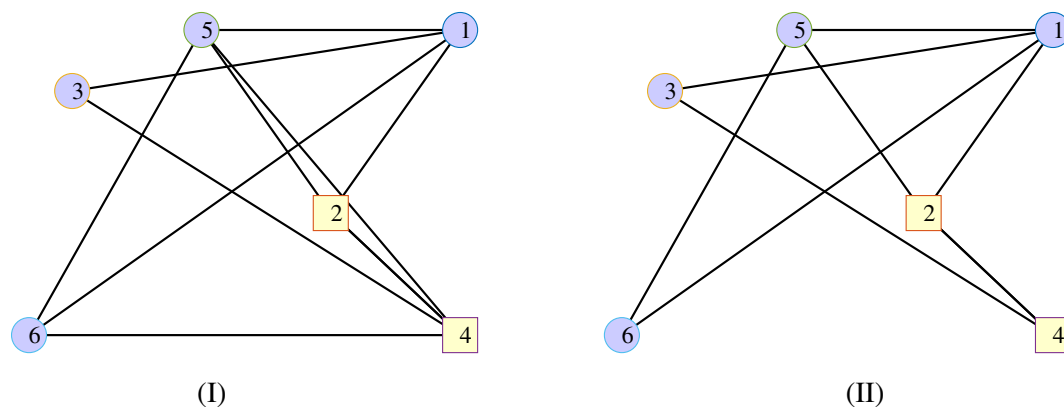


Figura 2: Resultado do planejamento ótimo de expansão da geração e da transmissão do Garver 6 Barras resolvido através de (I) abordagem hierárquica e (II) abordagem integrada, ambos por meio de programação linear.

duas abordagens estudadas, sendo que na abordagem hierárquica, é discutido o aumento do limite de geração adotado para tornar a solução factível, em comparação com a metodologia integrada.

Espera-se que este sistema forneça um exemplo dentro da análise das abordagens de planejamento conjunto de sistemas elétricos, considerando apenas custos operacionais dentro do planejamento da expansão da geração e da transmissão, para fins de simplificação.

#### 4.2. Planejamento ótimo

O sistema Garver 6 Barras foi simulado de acordo com as abordagens de expansão estudadas, a abordagem hierárquica, na qual foi considerado um aumento em 15% do limite máximo de geração em caso de solução infactível, e a abordagem integrada.

O resultado da expansão é ilustrado na Figura 2. Neste estudo, o resultado fornecido pelas abordagens estudadas possui algumas diferenças com relação às linhas introduzidas: na solução hierárquica foram introduzidas duas linhas a mais em relação ao problema integrado.

Em termos de dados, os resultados podem ser analisados na Tabela 2, para a abordagem hierárquica, que considera os limites da geração aumentados em 15% em caso de infactibilidade, e na Tabela 3, para a abordagem integrada. Note que essa formulação considera loops.

Em termos de custos, a abordagem integrada oferece uma solução de custo menor em relação à solução hierárquica, cuja análise é realizada a seguir.



Tabela 2: Resultado da abordagem hierárquica, com o percentual da geração relaxada em 15%.

| Geração: |            | Transmissão: |     |            | Transmissão: |     |             |
|----------|------------|--------------|-----|------------|--------------|-----|-------------|
| $v$      | $G_v$      | $i$          | $j$ | $P_e$      | $i$          | $j$ | $P_e$       |
| 1        | 236.538462 | 1            |     | 236.538462 | 5            | 2   | 15.000000   |
| 3        | 250.604523 | 2            |     | 15.000000  | 2            | 4   | 92.047930   |
| 5        | 60.000000  | 3            | 1   | 250.604523 | 3            | 4   | 85.000000   |
| 6        | 96.300000  | 5            | 1   | 60.000000  | 5            | 4   | 20.359477   |
|          |            | 6            | 1   | 96.300000  | 6            | 4   | 3.076211    |
| $C_{gT}$ | 643.442984 | 1            | 2   | 80.000000  | 5            | 6   | 44.000000   |
|          |            | 4            | 2   | 95.000000  | $C_{tT}$     |     | 1092.926602 |

Tabela 3: Resultado da abordagem integrada.

| Geração: |            | Transmissão: |     |            | Transmissão: |     |             |
|----------|------------|--------------|-----|------------|--------------|-----|-------------|
| $v$      | $G_v$      | $i$          | $j$ | $P_e$      | $i$          | $j$ | $P_e$       |
| 1        | 144.230769 | 1            |     | 144.230769 | 4            | 2   | 15.000000   |
| 3        | 221.309913 | 2            |     | 15.000000  | 5            | 2   | 15.000000   |
| 5        | 85.486364  | 3            | 1   | 221.309913 | 2            | 4   | 92.047930   |
| 6        | 214.655108 | 5            | 1   | 85.486364  | 3            | 4   | 85.000000   |
|          |            | 6            | 1   | 214.655108 | 5            | 6   | 62.690000   |
| $C_{gT}$ | 665.682154 | 1            | 2   | 80.000000  | $C_{tT}$     |     | 1030.420084 |

#### 4.3. Custos das abordagens

Conforme a análise de custo ótimo apresentada, a abordagem integrada pode fornecer um custo menor do que a abordagem hierárquica, porém, para se afirmar que a metodologia integrada é superior à hierárquica, é necessário analisar um dos fatores empregados nesta última, que consiste no aumento do limite superior da geração.

Este fator é considerado quando a solução encontrada na etapa de expansão da transmissão é infactível. Dessa forma, para se encontrar uma solução factível, seria necessário relaxar a geração de forma a viabilizar a solução encontrada. Se após esta etapa a solução ainda for infactível, o taxa de aumento adotada é desconsiderada.

Considerando esta metodologia, uma comparação entre as abordagens pode ser realizada considerando a taxa de aumento dos limites da geração no caso hierárquico, analisado em forma de histograma por taxa de aumento, enquanto o caso integrado possui seu custo constante, indicado por uma linha.

Desta forma, o resultado da comparação entre as abordagens é ilustrado na Figura 3.

De acordo com o gráfico e considerando que o planejamento hierárquico requer um aumento nos limites da geração, aumentando os custos de planejamento, percebe-se uma superioridade na metodologia integrada e, conforme a análise, a solução obtida pela metodologia hierárquica possui um custo, em geral, maior ou igual ao da abordagem integrada.

#### 5. Conclusão e estudos futuros

Neste trabalho, foi analisado o problema do planejamento conjunto da geração e da transmissão e as duas principais abordagens: hierárquica e integrada. Através do estudo de caso, estas abordagens foram estudadas, com resultados favoráveis à metodologia integrada, que consiste em resolver os problemas simultaneamente.

A análise, porém, deve ser aprofundada com outros estudos, como por exemplo, um cenário dinâmico, em que o planejamento é analisado em termos de tempo, definido em estágios. A ideia é, além de avaliar as soluções obtidas, avalia-se a factibilidade do problema, diante da análise temporal do problema.

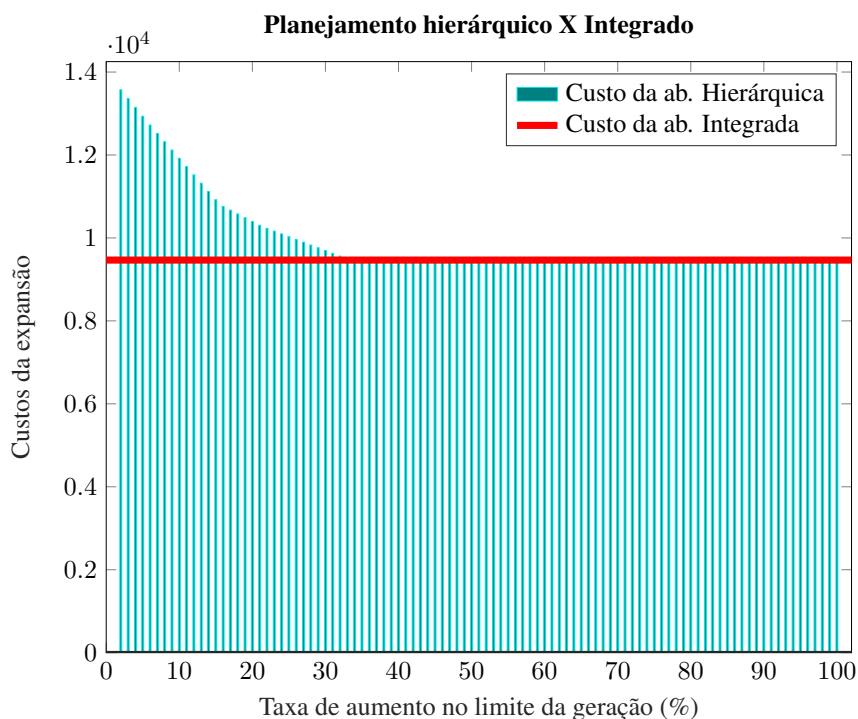


Figura 3: Resultado da comparação entre a abordagem hierárquica, de acordo com o percentual da geração relaxada, e a abordagem integrada.

Outro estudo relevante, consiste em avaliar diferentes fontes de geração empregadas no caso da expansão da geração. Em problemas que consideram a matriz energética, é importante verificar cenários de construção de usinas de fontes renováveis. Dessa forma, uma metodologia para comparação da abordagem integrada e hierárquica considerando as incertezas da geração hidrelétrica e eólica pode ser considerada, uma vez que o caso brasileiro apresenta particularidades como, por exemplo, a alta participação de hidrelétricas no parque gerador, e o recente aumento da fonte eólica. Ambas fontes introduzem incertezas nos fluxos de energia no sistema.

Além disso, devido à análise estocástica, o custo de expansão obtido por cada abordagem é representado por intervalos de custos. Dessa forma, a comparação passa a ser fundamentada em análises estatísticas. Outra fonte de incertezas que completa a análise deste trabalho, é a incerteza nos custos de expansão das linhas no planejamento de longo prazo, como por exemplo, alterações futuras nos custos após detalhamento do traçado. Enfim, deve-se indicar, na presença dessas incertezas, em quais situações cada abordagem de planejamento é melhor e situações onde elas são estatisticamente equivalentes.

### Agradecimentos

O presente trabalho teve o apoio financeiro das seguintes agências de fomento CNPq, FAPEMIG e CAPES.

### Referências

- Alizadeh, B. e Jadid, S., (2015). A dynamic model for coordination of generation and transmission expansion planning in power systems, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 65:408-418.
- Garver, L. L. (1970). Transmission Network Estimation Using Linear Programming, *IEEE Transaction on Power Systems*, 89(8):2025–2034.





- Gil, E., Aravena, I. e Cárdenas, R. (2015). Generation Capacity Expansion Planning Under Hydro Uncertainty Using Stochastic Mixed Integer Programming and Scenario Reduction, *IEEE Transactions on Power Systems*, 30(4):1838–1847.
- Hemmati, R., Hooshmand, R. A. e Khodabakhshian, A. (2013). Comprehensive review of generation and transmission expansion planning, *IET Generation, Transmission & Distribution*, 7(9):955–964.
- Javadi, M. S. e Saniei, M. (2011). Network Based Generation and Transmission Expansion Planning, *Proceedings of 2011 46th International Universities' Power Engineering Conference (UPEC)*, p. 1-6, Soest, Alemanha.
- Kim, H., Lee, S., Han, S., Kim, W. Ok, K. e Cho, S. (2015). Integrated Generation and Transmission Expansion Planning Using Generalized Bender's Decomposition Method, In *2015 IEEE International Conference on Computational Intelligence & Communication Technology*, p. 493-497, Ghaziabad, Índia.
- Marzano, L. G. B., Maceira, M. E. P., Justino, T. C., Melo, A. C. G., Lisboa, A. C. G., Duarte, V. S., Saboia, C. H. e Penna, D. D. J. (2010). Integrating short and long-term energy expansion planning tools for more resilient mid-term energy plans for the Brazilian interconnected system, In *VIII IREP Symposium Bulk Power System Dynamics and Control*, p. 1-10, Rio de Janeiro.
- Plano Decenal de Expansão de Energia 2024 / Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. Brasília: MME/EPE.
- Rebennack, S. (2014). Generation expansion planning under uncertainty with emissions quotas, *Electric Power Systems Research*, 114:78-85.
- Saboori, H., Mohammadi M. e Taghe, R. (2011). Composite Generation and Transmission Expansion Planning Considering the Impact of Wind Power Penetration, In *2011 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference*, p. 1-6, Wuhan, China.
- Saldarriaga-Zuluaga, S. D., López-Lezama, J. M. e Galeano, N. M. (2016). Planeamiento de la expansión integrada generación-transmisión: una revisión del estado del arte. *Tecno Lógicas*, 19(37):79–92.
- Sharan, I. e Balasubramanian, R. (2012). Integrated generation and transmission expansion planning including power and fuel transportation constraints, *Energy Policy*, 43:275-284.
- Thomé, F. S., Binato, S., Pereira, M. V. F., Campodónico N., Fampa, M. H. C. e da Costa Jr, L. C. (2013). Decomposition approach for generation and transmission expansion planning with implicit multipliers evaluation. *Pesquisa Operacional*, 33(3):343–359.
- You, S. Hadley, S.W., Shankar, M. e Liu, Y. (2016). Co-optimizing generation and transmission expansion with wind power in large-scale power grids – Implementation in the US Eastern Interconnection, *Electric Power Systems Research*, 133:209–218.