

XII SEPOPE
20 a 23 de Maio 2012
May – 20th to 23rd – 2012
RIO DE JANEIRO (RJ) -
BRASIL

XII SIMPÓSIO DE ESPECIALISTAS EM PLANEJAMENTO DA OPERAÇÃO E EXPANSÃO ELÉTRICA

XII SYMPOSIUM OF SPECIALISTS IN ELECTRIC OPERATIONAL AND EXPANSION PLANNING

Modelo de Planejamento de Redes de Transmissão Aplicado à Expansão do Sistema do WECC nos Estados Unidos

Gerson Couto Fernanda Thomé Ricardo Perez
Luiz M. Thomé Silvio Binato Mario Pereira
PSR

RESUMO

O objetivo deste trabalho é apresentar o modelo NXT, modelo para o planejamento da expansão de redes de transmissão que será utilizado pelo WECC (Western Electricity Coordinating Council), conselho que coordena os estudos de expansão da costa e meio oeste norte-americano. O sistema do WECC tem cerca de 200 GW de capacidade instalada, 2 milhões de km² de área e uma rede de transmissão de alta tensão com 15 mil barras e 20 mil circuitos, que conecta 14 estados norte-americanos, duas províncias canadenses e um estado do México. O objetivo do planejamento é encontrar o melhor equilíbrio entre os custos de investimento dos reforços de transmissão e as restrições / interesses de diferentes *stakeholders* que estão conectados ao sistema (grupos ambientalistas, tribos indígenas, instituições e agências federais e estaduais, concessionárias de energia elétrica, grandes consumidores e outros).

O modelo de planejamento da expansão contribui para o processo negocial destes acionistas através de dois tipos de resultado. Inicialmente, dado um conjunto de novas injeções de geração (por exemplo, grupos eólicos ou de geração solar), opções de reforço e penalizações /restrições em determinadas faixas de passagem, geralmente por razões ambientais, o modelo determina a expansão de mínimo custo global (soma dos custos de investimento e penalizações por impacto ambiental). A rede de transmissão é representada por um fluxo de potência linearizado, que inclui os circuitos AC, links DC e transformadores defasadores controláveis. As restrições incluem: (i) limites de carregamento nos circuitos; (ii) limites na soma dos fluxos que entram ou saem de determinadas regiões; (iii) limites nas diferenças angulares entre determinadas barras (ambos por razões de estabilidade); e (iv) penalizações por uso de determinadas faixas de passagem. O problema de expansão para cada estágio do horizonte de estudo é formulado como um modelo de otimização linear inteiro misto (MIP) de grande porte, que utiliza técnicas especializadas de solução para reduzir o esforço computacional. A aplicação do modelo será ilustrada para uma configuração reduzida do sistema WECC, com cinco mil barras e seis mil circuitos (aproximadamente as dimensões do sistema brasileiro).

Além do modelo de expansão da transmissão, foco deste artigo, o sistema de planejamento do WECC utiliza: (i) um modelo que cria faixas de passagem candidatas e circuitos candidatos; e (ii) um modelo alocar o custo dos reforços de transmissão entre os agentes participantes do sistema. Esta alocação permite que cada agente possa comparar os benefícios das restrições propostas pela mesma com os custos resultantes, contribuindo desta forma para o processo negocial.

Palavras Chave: Planejamento da expansão de redes de transmissão, otimização linear inteira mista.

1. Introdução

O problema de expansão dos sistemas elétricos visa escolher os melhores investimentos em geração e transmissão capazes de atender o crescimento da demanda, satisfazendo critérios de planejamento pré-definidos. Idealmente, este problema deveria ser feito de forma integrada, isto é, levando em consideração custos e benefícios associados aos reforços em instalações tanto de geração como também de circuitos do sistema de transmissão. Porém, devido a sua alta complexidade é necessária uma decomposição hierárquica do processo, em que as decisões relativas à expansão da geração e das interconexões regionais são tomadas em uma primeira etapa, enquanto que as decisões de expansão do sistema de transmissão são realizadas com o conhecimento da expansão da geração, bem como cenários de despacho também resultado do problema de expansão da geração. Por sua vez, a solução do problema de expansão da rede de transmissão requer o conhecimento de circuitos candidatos.

De acordo com os fatos explicitados acima, conclui-se que o problema de expansão pode ser decomposto em quatro subproblemas:

- a) Planejamento da expansão de novas centrais de geração e das interconexões regionais;
- b) Simulação dos despachos para usinas existentes e usinas pertencentes ao plano de expansão da geração;
- c) Determinação de novos corredores candidatos para a construção de novas linhas de transmissão;
- d) Modelo de planejamento da expansão da rede de transmissão.

O resultado do modelo **(a)** é a expansão da geração; em **(b)** são calculados cenários de despacho das usinas existentes e planejadas através de **(a)**, levando-se em consideração seus custos de produção; em **(c)** são analisadas e definidas as novas faixas de passagem que podem abrigar circuitos candidatos e o modelo **(d)** recebe as informações relativas à expansão da geração (e seus respectivos despachos) e aos novos corredores (incluindo seus fatores de impacto ambiental), define um conjunto de circuitos candidatos e, por fim, determina o plano de expansão da transmissão. Como subproduto da expansão da transmissão, o modelo **(d)** também calcula tarifas para acesso a rede – informações estas que auxiliam o modelo **(a)** a otimizar as decisões de investimento em geração, caracterizando portanto, o planejamento da expansão como um processo iterativo.

Além da economicidade no planejamento da expansão da rede deve-se salientar também a questão dos impactos ambientais decorrentes da construção de circuitos em áreas de preservação. Ao invés de simplesmente descartar candidatos em áreas de preservação, neste trabalho inclui-se um sobre-custo ao circuito candidato cuja faixa de passagem está em área de preservação, de modo que a meta do planejador é buscar o plano de expansão de mínimo custo total, atendendo as restrições operativas da rede.

Dada a crescente interligação dos sistemas elétricos, a dimensão da rede elétrica é tal que não é viável usar um procedimento manual de processar fluxo de potência com diferentes configurações de rede na busca da melhor alternativa. É fundamental dispor de um modelo de otimização combinatória capaz de tratar redes de grande porte, que represente as restrições operativas da rede, e que seja capaz de escolher a melhor alternativa sem fazer uma busca exaustiva do espaço de combinações de alternativas de expansão. O modelo de otimização linear inteiro misto, descrito a seguir, atende a estes requisitos, tendo sido selecionado pelo WECC (Western Electricity Coordinating Council) como o modelo a ser utilizado para o planejamento da expansão longo prazo para o sistema da costa e meio oeste norte-americano.

2. Formulação do modelo de planejamento da expansão de redes

Em problemas de planejamento da expansão de redes de transmissão é usual adotar o modelo de fluxo de potência linearizado. O modelo linearizado tem duas equações descritas a seguir:

Primeira lei de Kirchhoff (ou equação dos nós): representa que o balanço de potência em qualquer barra do sistema de transmissão é nulo, isto é:

$$\sum_{k \in \Omega_i} f_k + g_i - d_i = 0, \quad \forall i = 1, \dots, I; \quad (1)$$

onde I é o conjunto de todas as barras do sistema; f_k representa o fluxo de potência no k -ésimo circuito do sistema de transmissão; Ω_i é o conjunto de todos os circuitos (existentes e candidatos a reforço) conectados à barra i ; e g_i e d_i são, respectivamente, a geração e a carga na barra i .

Segunda lei de Kirchhoff (ou equação das malhas): representa que o balanço das diferenças dos ângulos de tensão multiplicadas pela susceptância dos circuitos em um “loop” da rede é nulo.

$$f_k - \gamma_k (\theta(i_k) - \theta(l_k)) x_k = 0, \quad \forall k = 1, \dots, K; \quad (2)$$

onde K é o conjunto de todos os circuitos (existentes ou candidatos), γ_k é a susceptância do circuito k ; $\theta(i_k)$ e $\theta(l_k)$ representam o ângulo da tensão das suas barras terminais i_k e l_k . A variável x_k representa a decisão de investimento no circuito candidato k , sendo $x_k = 1$ se o circuito está construído e $x_k = 0$ caso contrário. Por simplicidade de notação, representam-se todos os circuitos, existentes e candidatos, como candidatos, sendo que para os circuitos existentes a variáveis de decisão é conhecida ($x_k = 1$).

É importante destacar que o produto entre as variáveis de ângulo das barras θ e a decisão de investimento x torna o problema de planejamento da expansão da transmissão não linear e não convexo, sem haver um algoritmo que garanta encontrar a solução ótima. Como será apresentado na sequência, a reformulação das equações de malhas em restrições disjuntivas elimina a não linearidade do problema.

Limites operativos: O problema de planejamento da expansão de redes representa o limite \bar{f}_k de carregamento do k -ésimo circuito, como colocado a seguir.

$$-\bar{f}_k \leq f_k \leq \bar{f}_k, \quad \forall k = 1, \dots, K; \quad (3)$$

O modelo de fluxo de potência linearizado não representa certos tipos de problemas que afetam o comportamento dos sistemas de transmissão, por exemplo, problemas de estabilidade de tensão. Uma forma de modelar isto é com a adoção de restrições lineares que limitam transferências de potência entre áreas do sistema que apresentam as dificuldades mencionadas anteriormente. Estas restrições podem ser de dois tipos:

Restrições de soma de fluxo em circuitos selecionados:

$$\underline{F}_q \leq \sum_{k \in \Pi_q} f_k \leq \bar{F}_q, \quad \forall q = 1, \dots, Q; \quad (4)$$

onde Q é o conjunto de restrições de fluxo; $\underline{F}_q / \bar{F}_q$ são os limites mínimo e máximo para a soma dos fluxos nos circuitos selecionados na q -ésima restrição de soma de fluxo.

Restrições de diferença de ângulo entre barras selecionadas:

$$\underline{\theta}_s \leq \theta(i) - \theta(l) \leq \overline{\theta}_s, \quad i, l \in Y_s, \forall s = 1, \dots, S; \quad (5)$$

onde S é o conjunto de restrições de diferença de ângulo; Y_s representa o conjunto das barras selecionadas para a s -ésima restrição de diferença de ângulo; $\underline{\theta}_s / \overline{\theta}_s$ são os limites mínimo e máximo para a abertura angular entre as barras i e l definidas pelo usuário.

Reformulação da equação das malhas

Como ilustrado, a não linearidade das equações de balanço de tensões em malhas, fruto da multiplicação entre as variáveis de ângulo de tensão e decisão de investimento impossibilita a utilização de algoritmos de B&B para a solução do modelo de investimento. Para contornar esta dificuldade, foi proposto em [9] a reformulação das restrições de balanço de tensões em malhas através de uma restrição disjuntiva da seguinte forma:

$$-M_k (1 - x_k) \leq f_k - \gamma_k (\theta(i_k) - \theta(l_k)) \leq M_k (1 - x_k) \quad \forall k = 1, \dots, K; \quad (6)$$

onde M_k , é um parâmetro conhecido por constante disjuntiva. A igualdade entre as duas formulações pode ser facilmente demonstrada para um valor de M_k suficientemente grande da seguinte forma:

Caso $x_k = 1$ (circuito construído) $f_k - \gamma_k (\theta(i_k) - \theta(l_k)) = 0$, ou seja, a equação da segunda lei de Kirchhoff será representada.

Caso $x_k = 0$ (circuito não construído) $-M_k \leq f_k - \gamma_k (\theta(i_k) - \theta(l_k)) \leq M_k$, que para um valor de M_k suficientemente grande será uma restrição ilimitada que, portanto, não tem impacto no problema.

Sabe-se que a utilização de valores muito altos para constante disjuntiva leva a dificuldades numéricas para a solução do problema através de algoritmos B&B. Este problema foi solucionado com o desenvolvimento de uma metodologia para determinar o menor valor para a constante disjuntiva que ainda garante a igualdade entre ambas as formulações para a segunda lei de Kirchhoff, para maiores detalhes consulte as referencias [2, 5].

Por fim, para garantir que o fluxo seja nulo em circuitos não construídos, a restrição de limite de fluxo nos circuitos modifica-se para:

$$-x_k \bar{f}_k \leq f_k \leq \bar{f}_k x_k, \quad \forall k = 1, \dots, K; \quad (7)$$

Circuitos candidatos

Um ponto chave para as atividades de planejamento da expansão de sistemas de transmissão é determinar circuitos candidatos que devem estar disponíveis para o modelo de otimização selecionar aqueles que deverão ser construídos. No esquema proposto para utilização do modelo no WECC, utiliza-se um modelo auxiliar para criar faixas de passagem candidatas, onde é possível adicionar circuitos candidatos. Basicamente os seguintes dados estão associados a cada faixa de passagem: comprimento da faixa de passagem e fator ambiental. Esse último está associado ao impacto ambiental ocasionado pela construção de linhas que passem pela faixa.

Dadas as possíveis faixas de passagem e seus comprimentos, o NXT calcula os parâmetros dos circuitos candidatos que as utilizam, tais como resistência, susceptância, capacidades e custo de investimento, a partir de uma base de dados de valores típicos que inclui tipo do condutor, número de condutores por fase, separação dos feixes, disposição das fases e tipo da torre.

Para estimar os dados de transformadores candidatos, utilizam-se outros tipos de informação, como por exemplo, custos de “bays” de conexão e custos por capacidade do transformador.

Impacto ambiental na construção de linhas

A representação do impacto ambiental associado à construção de linhas é realizada através de restrições ambientais que tem por objetivo limitar o impacto causado pela construção de novos circuitos em uma determinada região ou mesmo em uma faixa de passagem. Como já ilustrado, a cada faixa de passagem associa-se um fator de impacto ambiental que pode ser utilizado em restrições ambientais formuladas da seguinte forma:

$$\sum_{j \in \Gamma_e} w_j x_j - \alpha_e \leq \omega_e, \forall e = 1, \dots, E; \quad (8)$$

onde w_j representa o fator de impacto ambiental associado a construção do circuito candidato j , ω_e representa o máximo impacto ambiental permitido pela restrição e , e α_e representa a violação da restrição ambiental (penalizada na função objetivo do modelo de otimização da expansão).

Função objetivo

A função objetivo consiste na minimização dos custos de investimento e penalidades associadas a inviabilidades, em restrições ambientais ou operativas (atendimento à carga, restrições de soma de fluxo ou de diferença de ângulo). Matematicamente, pode-se expressar a função objetivo do modelo de planejamento da expansão NXT por:

$$\text{Min} \sum_{j=1}^J c_j x_j + \delta \sum_{i \in \mathbb{Q}} \alpha_i \quad (9)$$

onde J denota o número de circuitos candidatos; c_j é o custo de investimento para a construção do j -ésimo candidato – cuja decisão de investimento está representada por x_j e δ é o valor unitário da penalidade associado a violação de alguma restrição do modelo, seja ambiental ou operacional, e α_i o valor da penalidade e \mathbb{Q} representa o conjunto de restrições penalizadas.

A implementação do modelo de otimização da expansão de redes de transmissão está implementada em linguagem de programação MOSEL e utiliza o solver XPRESS, ambos desenvolvidos pela Fico Optimization.

3. Visão geral do sistema do WECC

O WECC (Western Electricity Coordinating Council) é a maior das 8 entidades regionais responsáveis pela coordenação e promoção da confiabilidade do sistema elétrico norte-americano. Seu território tem aproximadamente 1,8 milhões de quilômetros quadrados e abrange a costa e o meio oeste norte-americano (14 estados), as províncias de Alberta e British Columbia no Canadá e a porção norte da Baja Califórnia, no México.

O sistema de transmissão coordenado pelo WECC tem cerca de 200 GW de capacidade instalada, uma rede de transmissão de alta tensão com mais de 15 mil barras e 20 mil circuitos. A figura 1 a seguir mostra o diagrama esquemático do sistema do WECC utilizando o modelo de planejamento da expansão de redes da transmissão que se na ferramenta NXT¹, desenvolvido pela PSR para ser utilizado pelo conselho nas atividades de planejamento da expansão da rede.

¹ O modelo NXT (Network Expansion Tool) foi desenvolvido para o WECC com base na ferramenta NetPlan (modelo de planejamento da expansão de redes de transmissão) da PSR.

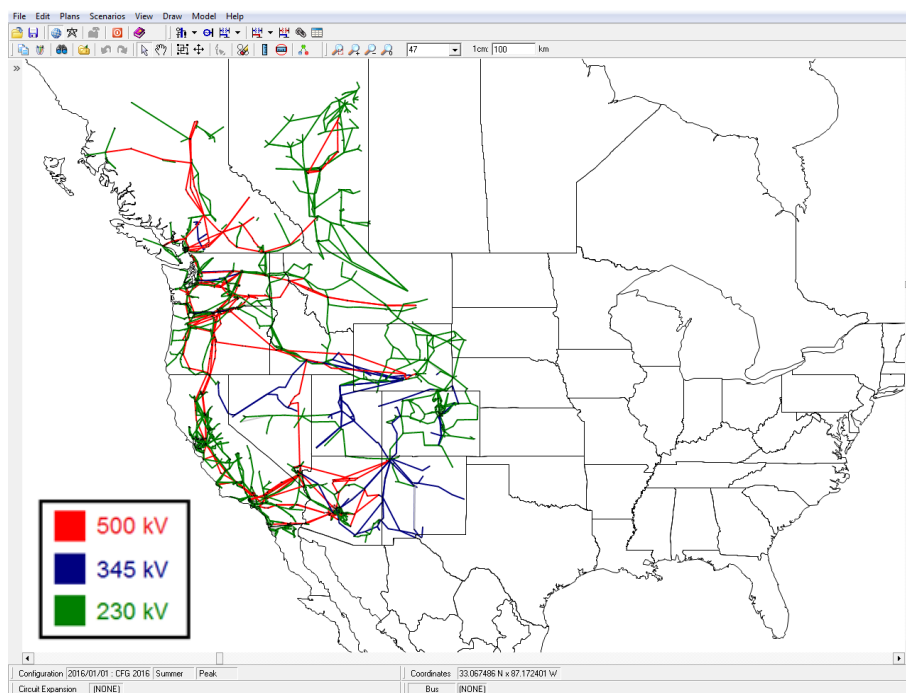


FIGURA 1 – Sistema de transmissão do WECC

4. Estudo de Caso

A aplicação do modelo NXT será ilustrada com uma configuração reduzida do sistema WECC com aproximadamente seis mil circuitos e cinco mil barras (dimensões similares às do sistema brasileiro). O objetivo do estudo de caso é ilustrar o processo, e determinar a expansão da rede de transmissão para o ano de 2016.

O primeiro passo do estudo de expansão da rede consiste em um diagnóstico da rede “existente” (prevista para 2015, por exemplo) para determinar sua adequabilidade com relação aos despachos previstos para 2016 (resultado do processo de expansão do sistema de geração).

O resultado desta análise está ilustrado na figura 2 a seguir em que os circuitos existentes são coloridos de acordo com o nível de carregamento dos mesmos (em azul os circuitos não carregados e em vermelho aqueles em que o carregamento está acima de 95%). Circuitos sobrecarregados estão destacados também em vermelho (maior espessura). Verificam-se 66 sobrecargas (violações operativas da capacidade dos circuitos).

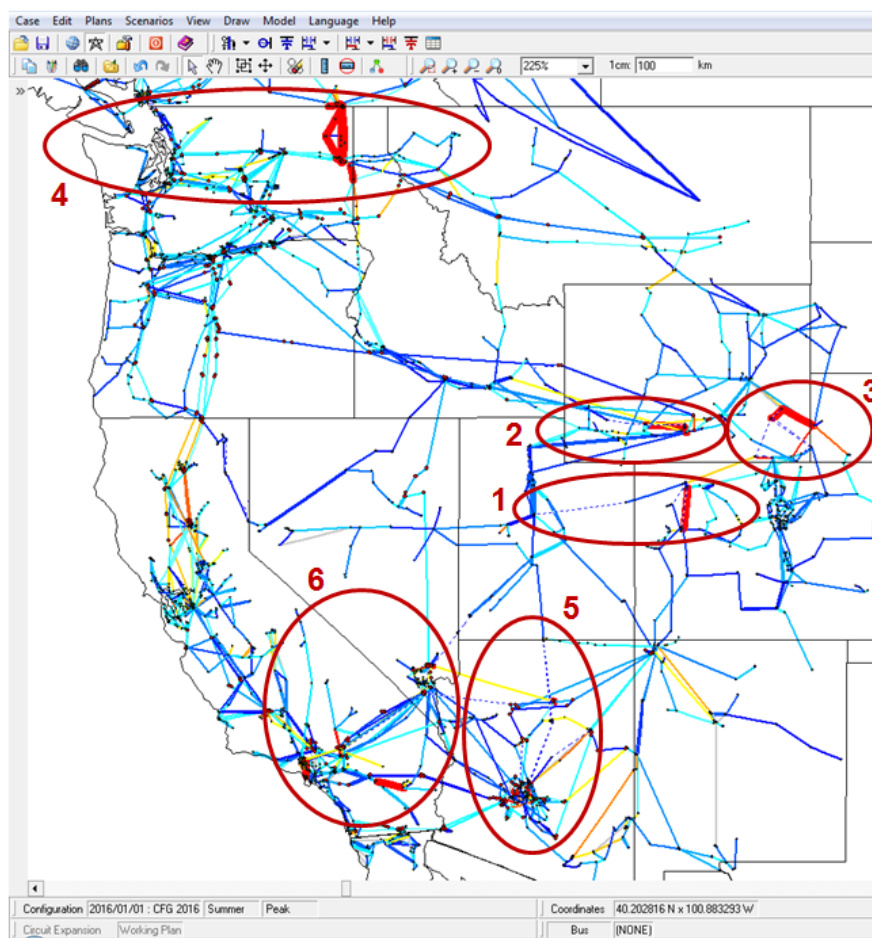


FIGURA 2 – Sobrecargas encontradas no sistema WECC

O resultado da análise de fluxo de potência será importante para determinar os candidatos que deverão ser criados para o planejamento da expansão. Como pode ser visto na figura anterior, pode-se agrupar as violações operativas observadas em 6 regiões do sistema de transmissão. Devido à grande extensão territorial do sistema do WECC, ilustra-se o processo de criação de candidatos para as regiões 1 e 2.

Análise de sobrecargas e construção de candidatos

Na região 1, apresentada na figura 3, a linha destacada em vermelho (230 kV, 478 MW de capacidade, 104 km de comprimento) apresenta uma sobrecarga de 5%. Para solucionar a sobrecarga foram propostos três circuitos candidatos para reforço:

- (i) Candidato 1: duplicação da linha sobrecarregada de 230 kV e investimento de 39 milhões de dólares;
- (ii) Candidato 2: construção de uma nova linha de 345 kV, capacidade 598 MW, 67 km e investimento estimado em 19 milhões de dólares;
- (iii) Candidato 3: construção de uma nova linha em 345 kV, capacidade de 725 MW de capacidade, 273 km de comprimento e investimento estimado em 78 milhões de dólares.

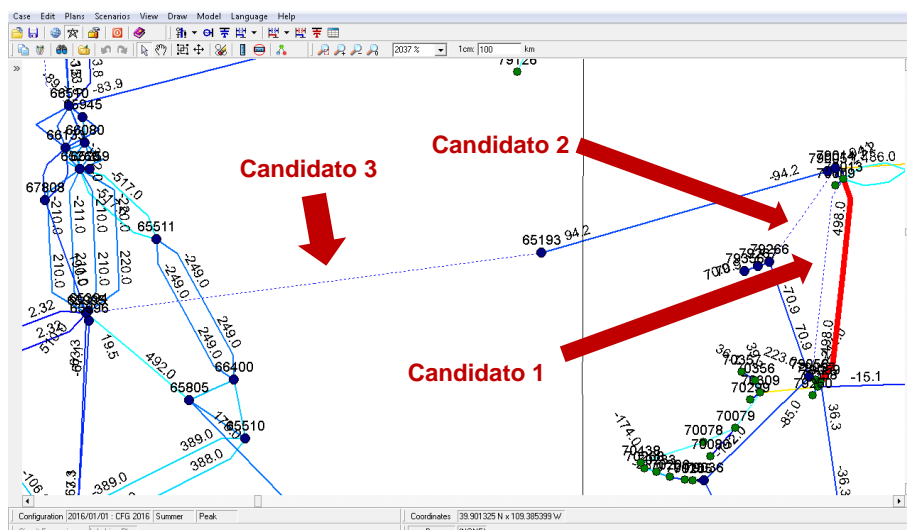


FIGURA 3 – Região 1: sobrecarga e candidatos

Na região 2, mostrada na figura 4, a linha em vermelho (345 kV, 985 MW de capacidade e 298 km de comprimento) está sobrecarregada em 8%. Para a solução da sobrecarga, os seguintes reforços foram propostos:

- (i) Candidato 4: duplicação da linha sobrecarregada de 345 kV e investimento de 87 milhões de dólares;
- (ii) Candidato 5: construção de uma nova linha de 345 kV, capacidade 956 MW, 177 km de comprimento e investimento estimado em 76 milhões de dólares;

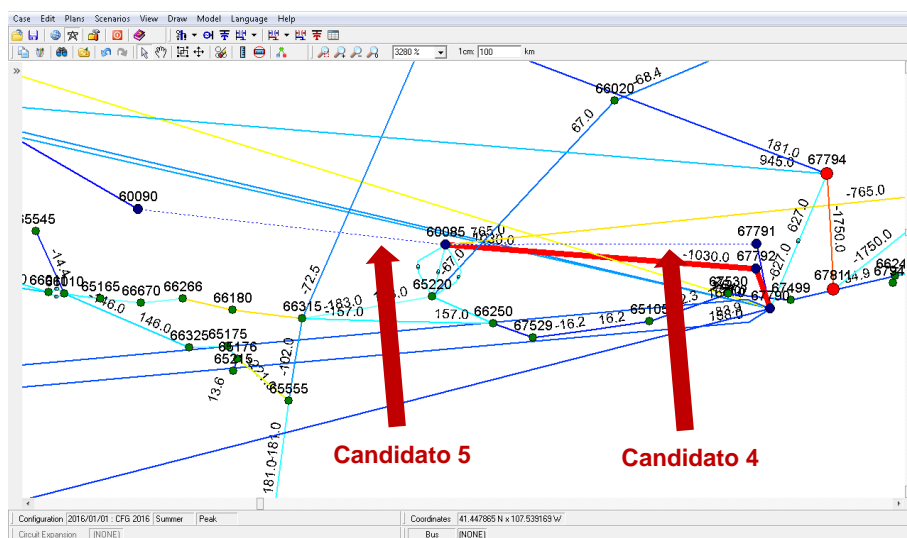


FIGURA 4 – Região 2: sobrecarga e candidatos

No total, foram considerados 143 circuitos candidatos para a solução das 66 violações observadas.

Modelo Linear Misto do Problema de Expansão da Transmissão

O modelo de otimização da expansão do sistema de transmissão, formulado de acordo ao exposto na seção 2, contém 143 variáveis de decisão de investimento (binárias). A matriz das restrições tem 10.400 linhas (restrições) e 15.100 colunas (variáveis).

Solução ótima do Problema de Expansão da Transmissão

A solução ótima foi obtida em cerca de 4 minutos (em um computador tipo Intel Quad-Core 2.4 GHz, 64 bits, com 8 Gb de memória RAM).

O plano de expansão ótimo é composto de 8 linhas de transmissão e 11 transformadores, com um custo total de investimento de cerca de US\$ 417 milhões, como ilustrado nas tabelas a seguir:

TABELA I – Plano de expansão de 2016 (linhas de transmissão)

Nº Barra DE	Nome Barra DE	Nº Barra PARA	Nome Barra PARA	Capacidade Nominal [MVA]	Carregamento [%]	Região	Custo [10 ⁶ U\$]
79014	CRAIG03	79266	MEEKER02	598	70	1	20
72811	ARCHER_T	73108	LAR.RIVR02	956	73	3	33
40323	CUSTER W02	50194	ING 500	2598	96	4	13
15021	PALOVRDE	15027	PALOVR&A	3421	46	5	36
15028	PALOVR&B	24900	COLRIVER	3421	46	5	40
79024	FLAGSTAF	79051	FLAGST&B	905	42	5	52
79024	FLAGSTAF	79055	FLAGST&C	905	42	5	52
79025	FLAGST&1	79032	GLENCANY02	871	87	5	57

TABELA II – Plano de expansão de 2016 (transformadores)

Nº Barra DE	Nome Barra DE	Nº Barra PARA	Nome Barra PARA	Capacidade Nominal [MVA]	Carregamento [%]	Região	Custo [10 ⁶ U\$]
40521	HATWAI02	40519	HATWAI01	1056	50	4	12
54258	ELLERSLI02	54128	ELLERSLI01	1200	87	4	14
14102	PNPKAPS02	14260	PPAPS C	625	46	5	8
79053	PINPKBRB	19062	PPKWAPA	600	64	5	8
79053	PINPKBRB	19062	PPKWAPA	600	63	5	8
18448	AMARGOSA03	18449	AMARGOSA04	672	60	6	9
18448	AMARGOSA03	18449	AMARGOSA04	672	60	6	9
24156	VINCENT02	24155	VINCENT01	1120	68	6	13
26079	TOLUCA03	26078	TOLUCA02	800	67	6	10
26079	TOLUCA03	26078	TOLUCA02	800	67	6	10
30735	METCALF02	30042	METCALF01	1122	76	6	13

5. Conclusões

O planejamento da expansão de sistemas de grande porte e complexidade como o WECC é uma tarefa bastante complexa, pois envolve interações com um grande número de atores; a criação de faixas de passagem e circuitos candidatos; a necessidade de encontrar o melhor equilíbrio entre custos de investimento e aspectos ambientais; e alocação dos custos entre os agentes de geração e demanda.

Mostrou-se que este problema pode ser resolvido de maneira eficiente por modelos de otimização baseados em técnicas programação inteira (MIP), onde o aperfeiçoamento chave é o uso de restrições disjuntivas com valores de “big M” ajustados de maneira a minimizar problemas de condicionamento da matriz.

Acreditamos que esta experiência com o planejamento e com as ferramentas computacionais utilizadas no WECC possa contribuir para o aperfeiçoamento dos estudos de outros sistemas de comparável, em particular o sistema brasileiro.

BIBLIOGRAPHY

- [1] G. N.Taranto, L.M.V.G. Pinto, and M.V.F.Pereira, "Representation Of FACTS Devices in Power System Economic Dispatch", IEEE Trans. Power Syst., vol. 7, pp 572-576, May 1992.
- [2] S. Binato, M. Pereira and S. Granville. "A new Benders decomposition approach to solve power transmission network design problems", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 16, No. 2, May 2001, pp. 235-240.
- [3] M. V. F. Pereira, "Aplicação de Análise de Sensibilidade no Planejamento da Expansão de Sistemas de Geração/Transmissão", Tese de Doutorado, COPPE, UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 1985.
- [4] R. Romero, "Planejamento da expansão de sistemas de transmissão por decomposição de Benders hierarquizada", Tese de Mestrado, UNICAMP, Campinas, SP, Brasil, Dec 1989.
- [5] S. Binato, "Expansão ótima de sistemas de transmissão através de decomposição de Benders e técnicas de planos cortantes", Tese de Doutorado, COPPE, UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, Abril 2000.
- [6] L. Bahiense., G. C. Oliveira, M. Pereira, S. Granville, "A Mixed Integer Disjunctive Model for Transmission Network Expansion", IEEE Transactions on Power Systems, v. 16, n. 3, pp. 560-565, Aug. 2001.
- [7] M. Pereira, L. M. G. V. Pinto, G. C. Oliveira, et alli, "Composite Generation-Transmission Expansion Planning", Report RP 2473-9, Electric Power Research Institute (EPRI), California, USA, 1987
- [8] S. Granville, M. Pereira, "Analysis of the Linearized Power Flow in Benders Decomposition", Report SOL 85-04, System Optimization Lab. Stanford University, 1985.
- [9] S. Granville, M. V. F. Pereira, G. B. Dantzig, B. Avi-Itzhak, M. Avriel, A. Monticelli, and L. M. V. G. Pinto. Mathematical decomposition techniques for power system expansion planning - analysis of the linearized power flow model using the Benders decomposition technique. Technical Report RP 2473-6, EPRI, 1988.
- [10] F. S. Thomé, "Application of decomposition technique with evaluation of implicit multipliers in electrical systems generation and network expansion planning", Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, 2008.
- [11] G. Latorre, R. D. Cruz, and J. M. Aleiza, "Transmission expansion planning: A classification of publications and models," Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on, vol. 18, no. 1, pp. 938-946, May 2003.