

Estratégia de Planejamento Ótimo da Expansão de Sistemas de Transmissão para Múltiplos Cenários de Geração

P. F. S. Freitas, Estudante Membro IEEE, A. Resende, R. Romero

Resumo--Com a reestruturação do setor elétrico, o planejamento da expansão de sistemas de transmissão vem passando por diversas modificações importantes desde o início da desregulamentação do setor elétrico, tornando-se complexo no desenvolvimento de uma rede de transmissão capaz de lidar com padrões futuros tanto de produção como de carga. O planejamento é muito importante, especialmente para evitar gastos desnecessários no processo de expansão do sistema de transmissão. Neste trabalho, é analisado o problema de planejamento da expansão de sistemas de transmissão (PEST) considerando múltiplos cenários de geração e usando o modelo linear disjuntivo. O problema de múltiplos cenários de geração aparece em diferentes contextos da operação de um sistema elétrico, especialmente no ambiente de mercado competitivo. A implementação computacional foi realizada em AMPL linguagem de modelagem matemática e utilizando para resolução o solver comercial CPLEX. Para validar a proposta apresentada foram usados os dados do sistema IEEE de 24 barras. Os resultados encontrados foram considerados satisfatórios considerando as características do solver testado e comparado com a literatura especializada, mostram a eficácia do método proposto.

Palavras Chave-- modelo linear disjuntivo, planejamento multiestágio, cenários de geração, AMPL linguagem de modelagem matemática e solver CPLEX.

I. NOMENCLATURA E SIMBOLOGIA

PEST - Planejamento de Expansão de Sistema de Transmissão.

v : Investimento na construção de novas linhas – função objetivo;

ij : Linhas entre as barras i e j ;

C_{ij} : Custo de uma linha no ramo ij ;

Y : Conjuntos de linhas candidatam a serem construídas no caminho ij ;

S : Conjunto de todos os cenários.

$w_{ij,y}$: Variáveis binárias, decidindo se uma linha será construída ou não no caminho ij ;

Ω_l : Conjunto de todos os caminhos existentes;

Ω_b : Conjunto de todas as barras do sistema elétrico;

Ω_o : Conjunto de caminhos em que existem linhas na topologia base;

$\bar{n}_{ij}$: Número máximo de linhas que poderão ser construídas no ramo ij ;

n_{ij}^o : Número de linhas existentes no ramo ij ;

θ_i : Magnitude do ângulo de tensão das barras pertencentes ao conjunto de barras;

x_{ij} : Reatância do circuito ij ;

f_{ij} : Fluxo de potência total que passa por todas as linhas de transmissão no caminho ij ;

f_{ij}^o : Fluxo de potência nas linhas candidatas;

$f_{ij,y}$: Fluxo total de potência que passa pelo circuito y no caminho ij ;

$f_{ij}^{o,s}$: Fluxo de potência das linhas existentes no caso base no caminho ij e no cenário s .

f_{ij}^s : Fluxo de potência do circuito y no ramo ij e no cenário s .

$f_{ij,y}$: Fluxo total de potência que passa pelo circuito y no caminho ij ;

$f_{ij,y}^{o,s}$: Fluxo de potência do circuito y no ramo ij e no cenário s .

θ_i^s : Ângulo de tensão na barra i no cenário s .

θ_{ref}^s : Ângulo de referência no cenário s .

g_i^s : Geração na barra i e no cenário s .

P. F. S. Freitas do Departamento de Engenharia Elétrica, Ilha Solteira – SP, Brasil. (patriciapbat@gmail.com).

A. Resende da Universidade do Estado de Mato Grosso, UNEMAT, MT, Brasil, adrisore@unemat.br

R. Romero do Departamento de Engenharia Elétrica, Ilha Solteira – SP, Brasil. (ruben@dee.feis.unesp.br).

- $\bar{f}_{ij}$: Fluxo de potência máxima permitido para um circuito no ramo ij ;
 d_i : Demanda de carga;
 g_i : Geração da barra i ;
 M : Parâmetro disjuntivo;
 $\bar{g}_i$: Geração máxima da barra i ;

II. INTRODUÇÃO

O problema de planejamento de expansão de sistemas de energia elétrica é um tópico de pesquisa muito importante pelo impacto que produz na operação otimizada dos sistemas de energia elétrica. Assim, esse tópico é amplamente pesquisado desde a década do 60 e cada vez aparecem novos modelos matemáticos e novas técnicas de otimização para resolver os problemas de Planejamento da Expansão de Sistemas de Transmissão (PEST). Para encontrar soluções adequadas, cada vez mais próximas da operação real de um sistema elétrico, são utilizados modelos matemáticos mais complexos e técnicas de otimização cada vez mais sofisticadas.

Os modelos matemáticos representam o problema de Planejamento de Expansão de Sistema de Transmissão (PEST), considerando complexidade e exatidão para a criação do modelo matemático [10]. Assim, apareceram os modelos de transporte, modelos híbridos, modelo DC, modelo linear disjuntivo e modelo AC [1,6,8,10]. Todos esses modelos diferem na forma em que se considera o modelo da rede, da geração e da demanda. Adicionalmente, podem ser incorporados no modelo exigências operacionais tais como o planejamento multietápico, a operação em mercado competitivo, as exigências de confiabilidade, a operação em múltiplos cenários de geração, entre outros [3,4].

Para obter uma solução ótima ou de boa qualidade para problemas de otimização complexos, é preciso um esforço computacional considerável. Soluções razoáveis podem ser obtidas usando heurísticas. Entretanto, para sistemas complexos, soluções de boa qualidade podem ser obtidos apenas usando meta-heurísticas especializadas ou técnicas exatas de otimização [7]. Para o problema PEST foram implementadas todas essas técnicas de otimização e para os diferentes modelos matemáticos [2,3,5,9,11,13,14,15].

No problema PEST são conhecidos a topologia base, os dados de geração e demanda do horizonte de planejamento e os dados elétricos, localização e custos das linhas de transmissão e transformadores que podem ser adicionados ao sistema elétrico. Pretende-se encontrar o plano ótimo de expansão, isto é, quais linhas de transmissão e transformadores devem ser construídos, otimizando o investimento e gerando um plano de expansão que permite que o sistema opere de forma adequada no horizonte de planejamento. Na formulação básica existe apenas um horizonte de planejamento e apenas um cenário de geração, isto é, o plano de geração mais provável, assim como também apenas a informação da demanda pico do horizonte de

planejamento. Neste trabalho abordamos o problema PEST considerando múltiplos cenários de geração.

Deve-se observar que o plano de geração de um sistema elétrico varia dinamicamente todos os dias. Em casos ideais essa variação pode ser pequena e proporcional, de forma que pode ser adequado considerar apenas o plano mais crítico para realizar trabalhos de planejamento da expansão de sistemas de transmissão. Entretanto, em alguns casos, os planos de geração podem variar de forma significativa e não proporcional. Esse tipo de operação acontece, por exemplo, em sistemas elétricos de forte base hídrica onde a geração pode variar muito de acordo com as estações do ano. Entretanto, essa variação pode ser mais crítica no ambiente de mercado competitivo onde o plano de geração é determinado de forma competitiva e pode variar através dos meses e dos anos [4].

Neste trabalho, analisamos e reformulamos o tópico de pesquisa de planejamento da expansão de um sistema de transmissão para múltiplos cenários de geração iniciada em [4]. Assim, pretende-se expandir o sistema elétrico para que opere de forma adequada para os diferentes planos de geração considerados previamente. Para analisar trabalhos do problema PEST considerando múltiplos planos de geração em ambientes mais gerais, pode-se consultar a referência [4].

Na proposta é considerado apenas um horizonte de planejamento e também usamos o modelo linear disjuntivo. Para resolver o modelo matemático usamos o CPLEX no ambiente AMPL. Para mostrar o desempenho da proposta, apresentam-se testes com o sistema IEEE de 24 barras.

O artigo está organizado na seguinte forma: na seção III apresenta-se o modelo matemático linear disjuntivo considerando um único cenário de geração e com múltiplos cenários de geração. Na seção IV são apresentados os detalhes do plano de expansão e análise de decisão. Finalmente na seção V apresenta as conclusões e considerações finais e na seção VI são apresentados os cenários de geração.

III. MODELAGEM MATEMÁTICA TRADICIONAL DE PLANEJAMENTO DE TRANSMISSÃO

O modelo CC é um modelo muito utilizado em planejamento de expansão de sistema de transmissão e representa uma generalização do modelo de fluxo de carga CC. Os circuitos integrados neste modelo consideram as duas leis de Kirchhoff e o modelo matemático é denominado um problema de Programação Não Linear Inteira Mista (PNLIM), possuindo diversas técnicas de otimização para a solução [12]. O modelo CC assume a seguinte forma:

$$\min v = \sum_{ij \in \Omega_l} c_{ij} n_{ij} \quad (1a)$$

s.a.

$$\sum_{ji \in \Omega_l} f_{ji} - \sum_{ij \in \Omega_l} f_{ij} + g_i = d_i \quad \forall i \in \Omega_b \quad (1b)$$

$$f_{ij} = \left(n_{ij} + n_{ij}^0 \right) \frac{(\theta_i - \theta_j)}{x_{ij}} \quad \forall_{ij} \in \Omega_l \quad (1c)$$

$$|f_{ij}| \leq \left(n_{ij} + n_{ij}^0 \right) \bar{f}_{ij} \quad \forall_{ij} \in \Omega_l \quad (1d)$$

$$0 \leq n_{ij} \leq \bar{n}_{ij} \quad \forall_{ij} \in \Omega_l \quad (1e)$$

$$n_{ij} \text{ inteiro} \quad \forall_{ij} \in \Omega_l \quad (1f)$$

$$\theta_i = 0 \quad \forall_i \in \Omega_b \quad (1g)$$

$$\theta_i \text{ irrestrito} \quad \forall_i \in \Omega_b \quad (1h)$$

$$f_{ij} \text{ irrestrito} \quad \forall_{ij} \in \Omega_b \quad (1i)$$

A função objetivo v , representada por (1a), é o investimento total em novas linhas de transmissão e transformadores. As restrições (1b) representam as equações correspondentes à primeira lei de Kirchhoff, uma equação para o balanço de potência em cada barra do sistema. As restrições (1c) representam, de forma aproximada, as equações correspondentes à segunda lei de Kirchhoff. Essas restrições são lineares e existe uma relação desse tipo por caminho em que existe ou pode existir uma linha de transmissão. As restrições (1d) representam o limite de capacidade de transmissão dos circuitos (linha e/ou transformadores). As restrições (1e) representam limites do número de linhas a serem instaladas em cada ramo $i j$. As restrições (1f) obrigam as variáveis n_{ij} assumirem valores inteiros, representando a maior fonte de complexidade no problema. A restrição (1g) escolhe a barra i como barra de referência e as restrições (1h) e (1i) definem a característica dos fluxos e dos ângulos das barras. Entretanto, deve-se observar que os valores dos ângulos estão limitados pelo valor do ângulo de referência e os valores dos fluxos estão limitados pelas relações (1d) e (1f).

Atualmente, o modelo CC é considerado ideal para trabalhos de planejamento. Entretanto, por ser um problema tipo PNLIM apenas as meta-heurísticas podem ser aplicadas, de forma eficiente, a esse modelo. Entretanto, foi provado que o ótimo do modelo CC é o mesmo do modelo linear disjuntivo [1]. Por esse motivo usamos neste trabalho o modelo linear disjuntivo e a resolução deste modelo é realizado usando o solver CPLEX. Adicionalmente, deve-se observar que o modelo CC, mostrado anteriormente, para um único cenário de geração, pode ser facilmente estendido para múltiplos cenários de geração. Também, na forma mais tradicional de planejamento a geração em cada barra é fixada, caracterizando o planejamento para um único cenário de geração, isto é, para o cenário mais provável.

A. Modelo Linear Disjuntivo de um Único Cenário de Geração

Como mencionado anteriormente, é possível transformar o modelo CC em um outro problema cujo ótimo é equivalente, em que o modelo matemático corresponde a um problema linear inteiro misto. Esse modelo é amplamente conhecido na literatura, para o modelo clássico tradicional de um estágio e

um cenário de geração [1,2].

O problema de planejamento utilizando o modelo linear disjuntivo, para um único cenário de geração, assume a seguinte forma:

$$\min v = \sum_{ij \in \Omega_l} c_{ij} \sum_{y \in Y} w_{ij,y} \quad (2a)$$

s.a.

$$\sum_{ji \in \Omega_l} \left(\sum_{y \in Y} f_{ji,y} + f_{ji}^0 \right) - \sum_{ij \in \Omega_l} \left(\sum_{y \in Y} f_{ij,y} + f_{ij}^0 \right) + g_i = d_i \quad \forall_i \in \Omega_b \quad (2b)$$

$$f_{ij}^0 = n_{ij}^0 \frac{(\theta_i - \theta_j)}{x_{ij}} \quad \forall_{ij} \in \Omega_l \quad (2c)$$

$$|f_{ij}^0| \leq n_{ij}^0 \bar{f}_{ij} \quad \forall_{ij} \in \Omega_o \quad (2d)$$

$$|x_{ij} f_{ij,y} - (\theta_i - \theta_j)| \leq M (1 - w_{ij,y}) \quad \forall_{ij} \in \Omega_l, \forall_y \in Y \quad (2e)$$

$$|f_{ij,y}| \leq w_{ij,y} \bar{f}_{ij} \quad \forall_{ij} \in \Omega_l, \forall_y \in Y \quad (2f)$$

$$\sum_{y \in Y} w_{ij,y} \leq \bar{n}_{ij} \quad \forall_{ij} \in \Omega_l, \forall_y \in Y \quad (2g)$$

$$w_{ij,y} \leq w_{ij,y} - 1 \quad \forall_{ij} \in \Omega_l, \forall_y \in Y \quad (2h)$$

$$w_{ij,y} \text{ binário} \quad \forall_{ij} \in \Omega_l, \forall_y \in Y \quad (2i)$$

A função objetivo representada pela equação (2a) é o investimento na construção de novas linhas de transmissão ou transformadores. As restrições (2b) representam as equações correspondentes à primeira lei de Kirchhoff, uma equação para o balanço de potência em cada barra do sistema. As restrições (2c) representam as equações correspondentes à segunda lei de Kirchhoff apenas para as linhas existentes. As restrições (2d) e (2f), descrevem o limite de capacidade de transmissão dos circuitos para linhas existentes e novas respectivamente, porém em (2d) a limitação é feita para a soma dos fluxos das linhas existentes no caminho $i j$ enquanto que em (2f) a limitação é feita individualmente para cada linha nova candidata a adição no ramo $i j$; o uso do valor absoluto é necessário posto que os fluxos podem fluir nos dois sentidos. As restrições (2e) representam a segunda lei de Kirchhoff para as linhas novas, uma restrição para cada linha candidata. As restrições (2g) representam os limites de adição de novas linhas a serem instaladas em cada ramo $i j$. As restrições (2h) obrigam a uma instalação sequencial das linhas novas em cada ramo $i j$ e evitam soluções iguais. A restrição (2i) caracteriza a variável $w_{ij,y}$ como sendo binária,

representando a maior fonte de complexidade no problema [1,12].

Uma das principais vantagens do modelo linear disjuntivo está ligada com a modelagem linear, pois possibilita o desenvolvimento de algoritmos adequados, com propriedades

de convergência interessantes do ponto de vista teórico e a inserção de variáveis binárias (variáveis inteiras n_{ij} , no modelo CC) [1,12]. Entretanto, o modelo linear disjuntivo apresenta dois problemas, isto é, a necessidade de escolher um parâmetro adequado M grande e o incremento explosivo das variáveis binárias. O primeiro problema se resolve de forma simples e existem propostas muito interessantes na literatura especializada para resolver esse problema [1,2]. Entretanto, o incremento das variáveis binárias e o consequente aumento das restrições tipo (2e) e (2f) ainda representam um problema quando se pretende resolver sistemas de grande porte e complexos. Para ilustrar essa dificuldade, por exemplo, se em um caminho é possível adicionar 5 linhas de transmissão, então para o modelo CC existe, para esse caminho, apenas uma variável de decisão inteira e uma restrição do tipo (1c) e outro do tipo (1d). Entretanto, para o modelo linear disjuntivo, para esse mesmo caminho, existem 5 variáveis binárias e 5 restrições do tipo (2e) e 5 do tipo (2f).

B. Modelo Linear Disjuntivo com Múltiplos cenários de Geração

O modelo linear disjuntivo para o problema PEST com um único cenário de geração pode ser estendido para o planejamento com múltiplos cenários de geração. Nesse caso, o sistema deve ser expandido para que opere de forma adequada para o horizonte de planejamento e para cada um dos cenários de geração previamente especificados. Esse modelo assume a seguinte forma:

$$\min v = \sum_{ij \in \Omega_l} c_{ij} \sum_{y \in Y} w_{ij,y} \quad (3a)$$

s.a.

$$\sum_{ij \in \Omega_l} \left(\sum_{y \in Y} f_{ij,y}^s + f_{ij}^{0,s} \right) - \sum_{ji \in \Omega_l} \left(\sum_{y \in Y} f_{ji,y}^s + f_{ji}^{0,s} \right) + g_i^s = d_i \quad \forall i \in \Omega_b, \forall s \in S \quad (3b)$$

$$f_{ij}^{0,s} = \gamma_{ij} n_{ij}^0 (\theta_i^s - \theta_j^s) \quad \forall ij \in \Omega_o, \forall s \in S \quad (3c)$$

$$|f_{ij}^{0,s}| \leq n_{ij}^0 \bar{f}_{ij} \quad \forall ij \in \Omega_o, \forall s \in S \quad (3d)$$

$$|f_{ij,y}^s - \gamma_{ij} (\theta_i^s - \theta_j^s)| \leq 2\bar{\theta} \gamma_{ij} (1 - w_{ij,y}) \quad \forall ij \in \Omega_l, \forall s \in S \quad (3e)$$

$$|f_{ij,y}^s| \leq w_{ij,y} \bar{f}_{ij} \quad \forall ij \in \Omega_l, \forall s \in S \quad (3f)$$

$$|\theta_i^s| \leq \bar{\theta} \quad \forall i \in \Omega_b, \forall s \in S \quad (3g)$$

$$\sum_{y \in Y} w_{ij,y} \leq \bar{n}_{ij} \quad \forall ij \in \Omega_l \quad (3h)$$

$$w_{ij,y} \leq w_{ij,y-1} \quad \forall ij \in \Omega_l, \forall y \in Y \quad (3i)$$

$$\theta_{ref}^s \quad \forall s \in S \quad (3j)$$

$w_{ij,y}$ binário

$$\forall ij \in \Omega_l, \forall y \in Y \quad (3k)$$

O modelo (3) apresentado é apenas uma generalização do modelo (2) para um único cenário de geração. Deve-se observar que se existem s cenários de geração, então o modelo (3) incrementa o número das principais restrições em s vezes. Também, deve-se observar que existem variáveis de operação para cada cenário de geração. Na verdade, existem s blocos independentes em relação com as variáveis de operação trabalhando de forma independente e esses s blocos se encontram interligados apenas pelas variáveis de planejamento, isto é, pelas linhas de transmissão e transformadores que devem ser adicionadas ao sistema elétrico. No modelo apresentado já foi escolhido um valor para o parâmetro M e também foram fixados limites angulares (que não seria obrigatória).

A variável binária é a mesma no modelo com um único cenário de geração, isto é, $w_{ij,y} = 1$ se a linha y foi adicionada no ramo ij e, obviamente, opera para todos os cenários de geração e $w_{ij,y} = 0$ se não existe adição.

Também, deve-se observar que a complexidade para resolver esse tipo de modelo não se incrementa de forma proibitiva. O tamanho do problema (o incremento das restrições e das variáveis reais se incrementa em torno de s vezes) se incrementa de forma significativa, mas o número de variáveis binárias (as mais complicadas na resolução do problema) permanece inalterado e, portanto, o tempo de processamento não se incrementa de forma significativa.

IV. RESULTADOS DE TESTES

Para mostrar o desempenho do modelo apresentado e da proposta de otimização sugerida, apresenta-se resultados de testes com o sistema IEEE de 24 barras. Para análise comparativa, mostramos os resultados apresentados em [4]. Nesse trabalho se aborda o problema de planejamento da expansão para 4 cenários de geração dentro de um ambiente de mercado competitivo. Entretanto, os autores de [4] usaram o modelo CC, o modelo de planejamento de um único cenário de geração e um algoritmo genético para resolver esse modelo. Assim, encontram 4 planos de expansão independentes e um desses planos é escolhido usando técnicas de escolha com a lógica de minimizar o mínimo arrependimento.

O sistema de IEEE de 14 barras tem 41 caminhos para adição de linhas de transmissão ou transformadores. Os dados das linhas podem ser encontrados em [4] e os dados dos 4 planos de geração, chamados de G1, G2, G3 e G4, podem ser encontrados no Apêndice e em [4]. A topologia desse sistema é mostrada na Figura 1.

A Tabela I apresenta os resultados de testes quando o sistema é expandido de forma independente, isto é, considerando cada plano de geração de forma separada e da mesma forma como foi realizada em [4]. Obviamente, o plano

de expansão encontrado usando os dados de um cenário de geração não opera de forma adequada para os outros cenários de geração. Adicionalmente, deve-se observar que os planos mostrados na Tabela 1 são ótimos para cada cenário de geração já que foi usado um método exato de otimização.

Assim, em [4] foi usado um algoritmo genético e os planos de expansão encontrados não foram os ótimos e com investimentos iguais a 454, 451, 292 e 376 milhões de dólares para os planos G1, G2, G3 e G4. Pode-se observar que esses valores de investimento diferem de forma muito significativa com os planos ótimos encontrados e mostrados na Tabela I. Dessa forma foi mostrada uma vantagem de usar técnicas de otimização exatas, sempre que possível.

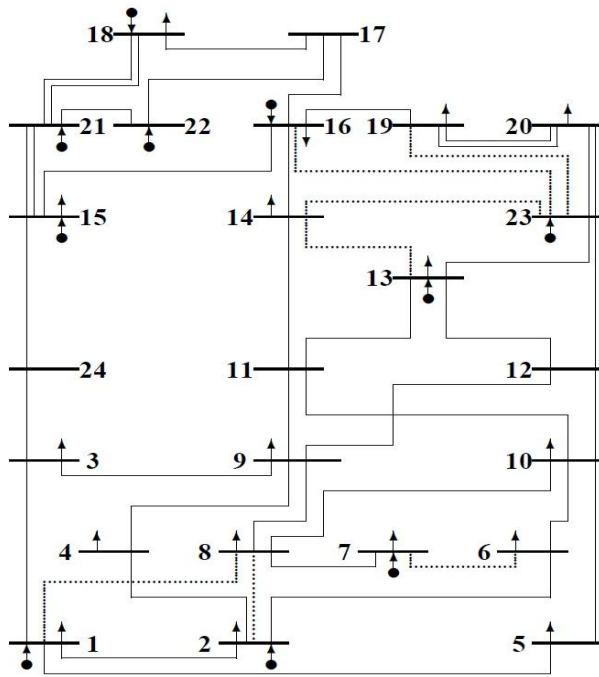


Fig. 1. Sistema Elétrico IEEE 24 barras - ROMERO et al. (2005)

TABELA I
Planos de expansão Independentes

Cenários	Número de linhas de transmissão ou transformadores adicionados	Investimento us\$ x 10^6
G1	$n_{01-05} = 1$, $n_{03-24} = 1$, $n_{06-10} = 1$, $n_{07-08} = 2$, $n_{14-16} = 1$, $n_{15-24} = 1$, $n_{16-17} = 2$, $n_{16-19} = 1$ e $n_{17-18} = 2$;	390
G2	$n_{01-05} = 1$, $n_{03-24} = 1$, $n_{06-10} = 1$, $n_{07-08} = 1$, $n_{10-12} = 1$, $n_{14-16} = 1$, $n_{15-24} = 1$, $n_{16-17} = 2$ e $n_{17-18} = 2$;	392
G3	$n_{06-10} = 1$, $n_{07-08} = 2$, $n_{10-12} = 1$, $n_{14-16} = 1$, $n_{16-17} = 1$ e $n_{20-23} = 1$;	218
G4	$n_{03-24} = 1$, $n_{06-10} = 1$,	

$n_{07-08} = 2$, $n_{09-11} = 1$, $n_{10-12} = 1$, $n_{14-16} = 2$ e $n_{16-17} = 1$.	342
---	-----

A Tabela II mostra o plano ótimo de expansão quando se usa o modelo de expansão para múltiplos cenários de geração, isto é, o modelo (3). Assim, a alternativa de expansão mostrada na Tabela 2 opera de forma adequada para cada um dos 4 cenários de geração. Obviamente, o plano ótimo de expansão é muito maior que os planos de expansão encontrados para cada cenário de geração, obtidos usando o modelo (2). Esse investimento é igual a $v = \text{US\$}532 \times 10^6$. Essa solução foi encontrada pelo CPLEX com um tempo de processamento de 50.42 s.

TABELA II
Multi Cenários de Geração

Ramos $i-j$	Quantidade de linhas
n_{01-05}	01
n_{03-24}	01
n_{06-10}	01
n_{07-08}	02
n_{10-11}	01
n_{13-14}	01
n_{14-16}	01
n_{15-24}	01
n_{16-17}	02
n_{16-19}	01
n_{17-18}	01
n_{20-23}	01

Uma alternativa interessante de pesquisa pode ser encontrar planos de expansão com custo de investimentos menores ao plano ótimo de expansão, mas que provoquem pequenos cortes de carga para alguns cenários de geração. Nesse caso, pode-se escolher a mesma estratégia usada em [4] para identificar os melhores planos de expansão.

V. CONCLUSÕES

No trabalho apresentado foi mostrada uma modelagem matemática, chamada de modelo linear disjuntivo para o planejamento ótimo da expansão de sistemas de transmissão considerando múltiplos cenários de geração. Esse tipo de estratégia pode ser importante se os planos de geração mudam de forma significativa o que pode acontecer, por exemplo, nas 4 estações do ano de um sistema fortemente hídrico e, de forma mais intensa, em sistemas elétricos que operam em ambiente de mercado competitivo. A proposta apresentada também mostra que pode ser inadequado expandir o sistema apenas considerando apenas um dos cenários de geração, tipicamente o mais crítico. Entretanto, uma proposta de expansão considerando todos os cenários de geração pode incrementar de forma significativa os custos de expansão o que obriga a quantificar de forma mais eficiente os cenários de geração e de encontrar formas alternativas de encontrar planos de expansão com menos custos de investimento em detrimento de pequenos cortes de carga para alguns cenários de geração.

Pode ser também interessante realizar testes com sistemas de maior porte e mais complexos.

VI. APENDICE

A topologia inicial do sistema elétrico IEEE 24 barras, consiste em 41 ramos e 4 cenários de geração apresentado na tabela III.

TABELA III
Dados de Geração – MW

Barras	Geração 1	Geração 2	Geração 3	Geração 4
1	576	465	576	520
2	576	576	576	520
3	0	0	0	0
4	0	0	0	0
5	0	0	0	0
6	0	0	0	0
7	900	722	900	812
8	0	0	0	0
9	0	0	0	0
10	0	0	0	0
11	0	0	0	0
12	0	0	0	0
13	1773	1424	1457	1599
14	0	0	0	0
15	645	645	325	581
16	465	465	282	419
17	0	0	0	0
18	1200	1200	603	718
19	0	0	0	0
20	0	0	0	0
21	1200	1200	951	1077
22	900	900	900	900
23	315	953	1980	1404
24	0	0	0	0

VII. REFERÊNCIAS

- [1] 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, p. 560–565, 2001.
- [2] S. Binato, G. de Oliveira, J. de Araújo. “A greedy randomized adaptive search procedure for transmission expansion planning”. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 16, n. 2, p. 247–253, 2001.
- [3] A. H. Escobar, R. A. Gallego, R. Romero. “Multistage and coordinated planning of the expansion of transmission systems”. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 19, n. 2, p. 735–744, 2004.
- [4] R. Fang, D. J. Hill. “A new strategy for transmission expansion in competitive electricity markets”. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 18, n. 1, p. 374–380, 2003.
- [5] H. Faria Junior., S. Binato, M. G. C. Resende, D. M. Falcão, “Power transmission network design by greedy randomized adaptive path relinking”. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 20, n. 1, p. 43–49, 2005.
- [6] L. L. Garver. “Transmission network estimation using linear programming”. *IEEE Winter Power Meeting*, New York, n. 70, p. 25–30, 1970.
- [7] F. Glover, G. A. Kochenberger, (Ed.). *Handbook of metaheuristics*. New York: Springer, 2003.
- [8] G. Latorre, R. D. Cruz, J. M. Areiza, A. “Villegas, Classification of publications and models on transmission expansion planning”. *IEEE Transactions on Power Systems*, New York, v. 18, n. 2, p. 938–946, 2003.

- [9] M. Rahmani, M. Rashidinejad, E. Carreno, R. A. Romero, “Efficient method for AC transmission network expansion planning”. *Electric Power Systems Research*, v. 80, n. 9, p. 1056–1064, 2010.
- [10] M. J. Rider, A. V. Garcia, R. Romero. “Power system transmission network expansion planning using AC model”. *IET Generation, Transmission and Distribution*, v. 1, n. 5, p. 731–742, 2007.
- [11] E. F. da Silva. “Planejamento estocástico da expansão da rede de transmissão de energia elétrica multiestágio considerando restrições de segurança”. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica)—Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2013.
- [12] E. L. da Silva, H. A. Gil, J. M. Areiza. “Transmission network expansion planning under an improved genetic algorithm”. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 15, n. 3, p. 1168–1174, 2000.
- [13] J. A. Taylor, F. S. Hover. “Conic AC transmission system planning”. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 28, n. 2, p. 952–959, 2012.
- [14] G. Vinasco, M. J. Rider, R. Romero. “A strategy to solve the multistage transmission expansion planning problem”. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 26, n. 4, p. 2574–2576, 2011.
- [15] R. Romero, C. Rocha, J. R. S. Mantovani, I. G. Sánchez, “Constructive heuristic algorithm for the dc model in network transmission expansion planning”. *IEE Proceedings Generation, Transmission and Distribution*, v. 152, n. 2, p. 277–282, 2005.

VIII. BIOGRAFIA

Patrícia Fernanda da Silva Freitas possui graduação em Sistemas de Informação pelas Faculdades Integradas de Paranaíba - FIPAR (2007), Especialista em Banco de Dados pela Universidade ANHANGUERA UNIDERP (2009), Mestre em Engenharia Elétrica pela Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho – UNESP (2013), Doutoranda em Engenharia Elétrica pela Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho – UNESP (2018). Linha de pesquisa em: Sistema Elétrico de Potência e planejamento de sistemas elétricos. Grupo de pesquisa: Laboratório de planejamento de sistemas de energia elétrica - LaPSEE.

Adriana Souza Resende: Possui graduação em Licenciatura Plena em Matemática (UFMT). Especialização em Álgebra pela Universidade de São Paulo (USP). Mestrado em Matemática pela Unicamp (2010). Doutorado pela Universidade Estadual Paulista (UNESP, 2014). Atualmente é professora efetiva na UNEMAT.

Ruben Romero: possui graduação, mestrado e doutorado em Engenharia Elétrica na Universidad Nacional de Ingeniería (UNI) em Lima-Peru, e na Unicamp, respectivamente. Atualmente é Professor Titular em Engenharia Elétrica na UNESP, campus de Ilha Solteira. Linha de pesquisa em: Planejamento da operação e da expansão de sistemas de transmissão e de sistemas de distribuição de energia elétrica, teoria e aplicação de meta-heurísticas e teoria e aplicação de técnicas exatas de otimização a sistemas de energia elétrica.