



Universidade Federal
do Rio de Janeiro
Escola Politécnica

Análise do Planejamento Multi-Etapa da Expansão da Transmissão de Sistemas Regionais

Lucas Yukio Okamura Ribeiro

Projeto de Graduação apresentado ao
Curso de Engenharia Elétrica da Escola
Politécnica, Universidade Federal do Rio
de Janeiro, como parte dos requisitos
necessários à obtenção do título de
Engenheiro.

Orientadores: Carmen Lucia T. Borges
Ricardo Cunha Perez

Rio de Janeiro
Janeiro de 2017

ANÁLISE DO PLANEJAMENTO MULTI-ETAPA DA EXPANSÃO DA TRANSMISSÃO DE SISTEMAS REGIONAIS

Lucas Yukio Okamura Ribeiro

PROJETO DE GRADUAÇÃO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO ELETRICISTA

Examinada por:

Prof. Carmen Lucia Tancredo Borges, DSc.

Eng. Ricardo Cunha Perez, MSc.

Prof. Glauco Nery Taranto, PhD.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

JANEIRO DE 2017

Okamura Ribeiro, Lucas Yukio.

Análise do Planejamento Multi-Etapa da Expansão da Transmissão de Sistemas Regionais/ Lucas Yukio Okamura Ribeiro – Rio de Janeiro: UFRJ/ ESCOLA POLITÉCNICA, 2017.

VIII, 47 p.: il,; 29,7 cm.

Orientadores: Carmen Lucia Tancredo Borges, Ricardo Cunha Perez.

Projeto de Graduação – UFRJ/POLI/ Curso de Engenharia Elétrica, 2017.

Referências Bibliográficas: p. 46-47.

1.Método de Resolução Multi-Etapa do Planejamento da Expansão da Transmissão para Sistemas Regionais. 2. Planejamento da Expansão da Transmissão. I. Tancredo Borges, Carmen Lucia *et al* II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ, Curso de Engenharia Elétrica. III. Título.

Agradecimentos

Primeiramente, gostaria de agradecer à PSR por disponibilizar todas as ferramentas necessária para a execução deste trabalho. Em especial, agradeço profundamente ao meu co-orientador e amigo Ricardo, pelo ensinamentos, apoio e suporte incondicional durante todo processo de execução do trabalho, ao Mario, pela idealização e motivação do tema abordado no trabalho, e à Maria de Luján, por sempre tirar as dúvidas que surgiam em relação a metodologia apresentada neste trabalho.

Agradeço também aos professores do DEE, cujos ensinamentos foram fundamentais para a minha formação, em especial à minha orientadora Carmen, por me dar total liberdade para realizar o trabalho em conjunto com a PSR.

Por último, mas não menos importante, agradeço aos meus pais e aos meus amigos por sempre apoiarem minhas decisões de minha vida acadêmica; meus colegas de faculdade, por me ajudarem sempre seja nos estudos para as provas, nos laboratórios ou nos trabalhos; e a minha namorada, pelo suporte nos momentos de trabalho duro.

Resumo do Projeto de Graduação apresentado à Escola Politécnica/UFRJ como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Engenheira Eletricista

Análise do Planejamento Multi-Etapa da Expansão da Transmissão de Sistemas Regionais

Lucas Yukio Okamura Ribeiro

01/2017

Orientador: Carmen Lucia Tancredo Borges

Co-orientador: Ricardo Cunha Perez

Curso: Engenharia Elétrica

O planejamento da expansão da transmissão de sistemas elétricos é um componente fundamental na busca do equilíbrio entre oferta e demanda de energia elétrica no longo prazo. Caso se almeje encontrar o plano de mínimo custo, técnicas de otimização aplicadas por modelos computacionais geralmente são utilizadas. Entretanto, se a rede de transmissão a ser expandida apresentar inúmeros circuitos, a resolução do problema pode requerer esforços computacionais demasiados. O presente projeto de graduação apresenta uma metodologia de cálculo do plano de expansão da transmissão ótimo para sistemas grandes, compostos por múltiplos subsistemas ou países, sem uma exigência computacional representativa. Primeiramente, uma breve revisão bibliográfica será apresentada a respeito das técnicas de planejamento da expansão da transmissão existentes na literatura. Logo em seguida a metodologia proposta será minuciosamente abordada e aplicada a um caso que representa a rede de transmissão do sistema centro-americano.

Palavras-chave: Planejamento da Expansão da Transmissão, Decomposição, Modelo Disjuntivo.

Abstract of Undergraduate Project presented to POLI/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Engineer.

Analysis of the Multi-Stage Transmission Expansion Planning for Regional Systems

Lucas Yukio Okamura Ribeiro

01/2017

Advisor: Carmen Lucia Tancredo Borges

Co-advisor: Ricardo Cunha Perez

Course: Electrical Engineering

The transmission expansion planning of electrical systems is a key component to ensure a long-term equilibrium between the demand and supply of electrical energy. If the objective is to seek the plan with minimum investment costs, optimization techniques applied by computational models are normally used. However, if the transmission system has too many circuits, those models can require big computation efforts to find the optimal solution. This course conclusion work presents a methodology to calculate the optimal transmission expansion plan for transmission systems composed by multiples subsystem or countries, without requiring representative computation efforts. Firstly, a quick literature review about transmission expansion planning techniques will be presented. After that, the proposed methodology will be explained and applied in a case that represents the Central America transmission system.

Keywords: Transmission Expansion Planning, Decomposition, Disjunctive Model.

Sumário

1.	Introdução	1
1.1	Introdução e Objetivo	1
1.2	Relevância do Tema.....	2
1.3	Estrutura do Trabalho	3
2	Introdução ao Planejamento da Expansão da Transmissão	5
2.1	Métodos de Resolução do Problema.....	6
2.2	Tratamento de Incertezas e Critérios de Segurança.....	7
2.3	Tratamento do Horizonte de Planejamento.....	7
2.4	Sistemas de Transmissão Regionais	8
3	Formulação Matemática do Problema de Expansão da Transmissão	10
3.1	Conceitos Relevantes para a Formulação do Problema.....	10
3.1.1	Fluxo de Potência Linearizado ou Fluxo de Potência DC	10
3.1.2	Primeira Lei de Kirchhoff.....	11
3.1.3	Segunda Lei de Kirchhoff.....	12
3.1.4	Limites de Fluxo nos Circuitos	12
3.1.5	Múltiplos cenários de despacho	13
3.2	Formulação	13
3.2.1	O Modelo de Transportes.....	13
3.2.2	O Modelo Linear Híbrido	17
3.2.3	O Modelo Linear Disjuntivo.....	18
4	Resolução do Problema de Expansão da Transmissão para Sistemas Regionais	21
4.1	Características da Resolução.....	21
4.2	Algoritmo do Método de Resolução	22
4.2.1	Fase Heurística.....	23
4.2.2	Fase Decomposição	26
5	Estudo de Caso: América Central	32
5.1	Características do Caso	32
5.2	Dados de Entrada	35
5.3	Resultados	37

5.3.1	Análise pré-expansão	37
5.3.2	Análise da expansão.....	38
6	Conclusão.....	43
7	Trabalhos Futuros	45
8	Bibliografia	46

Lista de Figuras

Figura 1- Diferentes Classificações do Planejamento de Expansão da Transmissão [2]	5
Figura 2 – Fase Heurística	25
Figura 3 - Decomposição Aplicada na Expansão da Transmissão	27
Figura 4 – Fase Decomposição	30
Figura 5 – Mercado elétrico regional da América Central [13].....	33
Figura 6 - Capacidades das interconexões do MER	33
Figura 7 - Capacidade Instalada e Geração Média por Tecnologia [13]	34
Figura 8 - Projeção de Demanda do MER	34
Figura 9 - Sistema de Transmissão do MER	35

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Número de Circuitos Candidatos por País.....	36
Tabela 2 - Custos Marginais de Operação sem Expansão	37
Tabela 3 - Risco de Déficit sem Expansão	37
Tabela 4 - Tempo Computacional Requerido para Resolução dos Planos Anuais.....	39
Tabela 5 - Plano de Expansão da Transmissão.....	39
Tabela 6 - Custos Marginais de Operação com Expansão.....	40
Tabela 7 - Risco de Déficit com Expansão	40

1. Introdução

1.1 Introdução e Objetivo

O principal objetivo do planejamento da expansão de um sistema elétrico é garantir um equilíbrio entre a geração e a demanda de energia elétrica do sistema ao longo de um horizonte de estudo. Como a demanda de energia elétrica tende a aumentar ao longo dos anos, a adição de mais geradores, para aumentar a produção de energia, e circuitos, para estender a capacidade de transferência de energia, ao sistema se torna necessária para que a demanda seja atendida totalmente sem que haja sobrecargas em equipamentos do sistema.

Devido a extensa diversidade de opções de investimento em geração e transmissão que atendem o objetivo de suprir a demanda futura, o planejador deve atentar-se para os custos atrelados a essas decisões de investimento, que basicamente são os custos de investimento e de operação dos projetos. Ademais, um sistema efetivamente planejado deve atender critérios econômicos, critérios de segurança (N-1, N-2 etc.) e questões ambientais impostas por políticas energéticas nas quais qualquer sistema elétrico está sujeito. Portanto, cabe ao planejador buscar sempre o conjunto de decisões de investimento mais barato, conhecido como solução ótima, que atenda a todos esses critérios.

Um dos principais desafios do problema de planejamento da expansão é o tratamento de incertezas ligadas ao crescimento da demanda e à disponibilidade de recursos naturais renováveis essenciais para a geração de energia elétrica (vazão hidrológica dos rios, velocidade dos ventos etc.), principalmente para sistemas que apresentam uma matriz energética com forte participação desses recursos. A consideração dessas incertezas causa uma variabilidade no despacho, justificando a necessidade de que as redes de transmissão planejadas sejam robustas para diversos cenários de despacho. Todos esses fatores mencionados até então tornam o problema de expansão significativamente complexo de ser resolvido [1], [2].

Além disso, resolver o problema de planejamento da expansão da geração e da transmissão ao mesmo tempo pode dificultar ainda mais a solução do problema, devido à sua natureza combinatória. Uma alternativa, muito usada por diversos países, é resolver os dois problemas separadamente e de forma hierárquica, em que o plano de expansão da geração e de interconexões (para sistemas regionais) é calculado primeiro e depois calcula-se o plano de

expansão da transmissão fixando o plano encontrado na primeira etapa e considerando os cenários de despacho do sistema gerados com o mesmo. Dessa forma, a expansão da transmissão é feita para acomodar as decisões de investimento em geração, garantindo que o despacho do sistema chegue a carga sem que haja sobrecargas nos equipamentos de transmissão (linhas, transformadores etc.).

Para resolver o problema de expansão da transmissão supracitado, técnicas de otimização e modelos computacionais são utilizados. Para sistemas regionais e/ou que buscam um planejamento em um horizonte de estudo extenso, o esforço computacional pode ser demasiadamente grande. Nestes casos, há um *trade-off* entre a qualidade da solução e o tempo computacional da execução do modelo e assim, heurísticas são usualmente aplicadas para que boas soluções sejam encontradas com uma alta redução do esforço computacional exigido.

O objetivo do presente trabalho de conclusão de curso é apresentar uma metodologia de cálculo de planos de expansão de um sistema de transmissão regional, ou seja, composto por várias regiões (subsistemas) ou países. Essa metodologia é aplicada através de um modelo computacional baseado em programação linear inteira mista, que calcula os planos de expansão através de um planejamento multi-etapa e sob incertezas representadas por múltiplos cenários de despacho.

1.2 Relevância do Tema

A necessidade das redes elétricas atuais em reforçar seus sistemas de transmissão para evitar possíveis sobrecargas de equipamentos e cortes de carga dá relevância ao presente trabalho, pois este busca determinar esses reforços de transmissão com custo mínimo, através de um modelo de otimização. A determinação desses reforços, portanto, são extremamente importantes para o planejamento das redes elétricas existentes no mundo inteiro, pois além de representarem desafios reais enfrentados por planejadores de qualquer sistema elétrico em expansão, englobam questões técnicas e econômicas ao mesmo tempo.

A resolução por região proposta no trabalho consiste em um modo de resolver a expansão da transmissão quando o objetivo é encontrar o plano de expansão de países interconectados ou de diferentes subsistemas de um sistema de grande porte (como é o caso do SIN – Sistema Interligado Nacional – brasileiro). A alta complexidade existente na resolução da expansão para um sistema desse porte e o fato de que uma linha de transmissão adicionada

em determinada região provavelmente não influenciará representativamente na distribuição de fluxo das linhas localizadas em uma região geograficamente distante da primeira, torna esse processo de resolução extremamente interessante.

Além disso, o uso de um planejamento multi-etapa, caracterizado como *forward*, que consiste em gerar planos de expansão estáticos em cada etapa (ano a ano, por exemplo), avançando no tempo, torna o modelo ainda mais próximo do mundo real, pois o planejamento de sistemas de transmissão é feito de forma a acompanhar o crescimento da demanda, crescimento que possui uma relação direta com as premissas e projeções macroeconômicas (como por exemplo o PIB de um país).

Finalmente, a consideração de incertezas por cenários de despacho faz com que o plano de expansão encontrado seja robusto frente aos diferentes despachos que poderão ocorrer no futuro. Um exemplo da relevância disso é a grande diferença presente nos cenários de despacho entre períodos secos e úmidos para sistemas que possuem muitas hidrelétricas (que é o caso do Brasil), que causa uma grande diferença na distribuição de fluxos no sistema entre esses períodos. A consideração dessa incerteza na geração do plano de expansão torna-o mais apto a suportar essa alta variabilidade no despacho no futuro.

1.3 Estrutura do Trabalho

O presente trabalho está organizado da seguinte forma:

No Capítulo 2, apresenta-se uma introdução do planejamento da expansão da transmissão. Nele os principais métodos de solução do problema de expansão presentes na literatura são mostrados em conjunto com as diferentes classificações do planejamento em relação ao tratamento de incertezas, período de estudo e dimensão dos sistemas a serem expandidos.

No Capítulo 3, são apresentados os três principais modelos de formulação matemática do problema de expansão da transmissão existentes e os conceitos físicos e simplificações por trás dessas formulações.

Na sequência, o Capítulo 4 propõe um método para a resolução do problema de expansão da transmissão para sistemas regionais, ou seja, sistemas compostos por subsistemas ou países independentes interligados entre si. Nele, é descrito o modelo de formulação

matemática utilizado, as etapas de solução do problema de otimização e as heurísticas utilizadas para tornar a resolução do problema executável computacionalmente.

Já o Capítulo 5 apresenta o estudo de caso, na qual foi utilizado o sistema elétrico da América Central como exemplo para a aplicação do método descrito no capítulo anterior. As características do sistema são expostas, bem como o procedimento das rodadas e uma análise dos resultados adquiridos.

No Capítulo 6, apresenta-se a conclusão do trabalho, indicando os principais pontos positivos da metodologia proposta. O Capítulo 7 aponta trabalhos futuros a serem realizados sobre o tema abordado. Finalmente, as referências utilizadas durante a execução do trabalho podem ser vistas no Capítulo 8.

2 Introdução ao Planejamento da Expansão da Transmissão

O planejamento da expansão da transmissão consiste em determinar os circuitos a serem construídos que apresentam um menor custo de investimento total e eliminam sobrecargas e cortes de carga, nas quais qualquer sistema elétrico está sujeito no futuro com a natural tendência de crescimento da demanda.

Além disso, o sistema planejado deve suportar, obedecendo os critérios mencionados acima, diferentes níveis de carga, cenários de despacho e trocas de energia com outras regiões, sem deixar de atender critérios econômicos, ambientais e de segurança impostos por políticas energéticas locais. Logo, encontrar o conjunto de circuitos que atendam todas essas especificações consiste em um problema bastante complexo.

Nessa seção serão apresentados brevemente os principais métodos de resolução do problema de expansão da transmissão existentes na literatura com suas diferentes formas de tratamento de incertezas e horizontes de planejamento, ilustrados na **Figura 1** abaixo. Será mostrado também um método de expansão de sistemas regionais.

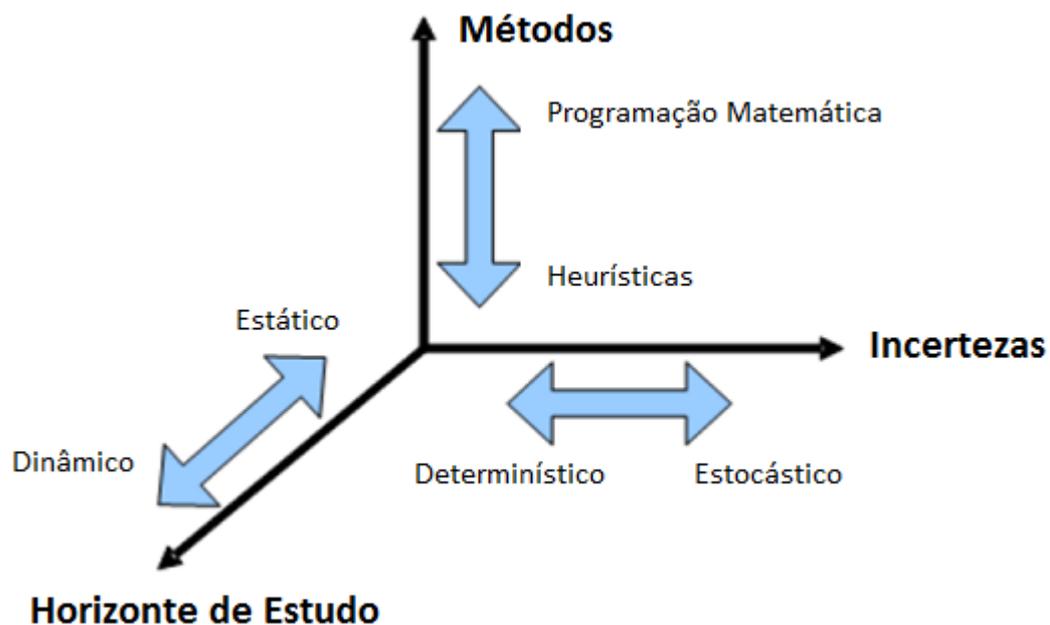


Figura 1- Diferentes Classificações do Planejamento de Expansão da Transmissão [2]

2.1 Métodos de Resolução do Problema

As formas utilizadas atualmente para resolver o problema de expansão da transmissão podem ser interativas (com intervenção do homem nas decisões de planejamento durante o processo de solução) ou automáticas (sem a intervenção do homem), utilizando modelos computacionais [3]. Desde os anos 70, modelos computacionais de planejamento de sistemas de transmissão estão sendo desenvolvidos com base em técnicas de otimização. Atualmente, os métodos de solução desses modelos podem ser classificados basicamente em dois tipos: métodos heurísticos e métodos de otimização matemática. Há também métodos que possuem características de ambos tipos, chamados de métodos meta-heurísticos [2] .

Os modelos computacionais que utilizam métodos de otimização resolvem uma formulação matemática do problema de expansão da transmissão, composta por uma função objetivo sujeito a uma série de restrições, que representam as características técnicas, econômicas e de confiabilidade do sistema de transmissão modelado. Devido à dificuldade de resolução do problema causada pela representação de todos os aspectos dos sistemas de transmissão no modelo, o plano ótimo é normalmente encontrado sob consideráveis simplificações.

De acordo com PEREZ [2] , as técnicas de otimização utilizadas por esses métodos para resolver o problema de expansão da transmissão normalmente são as clássicas [3] (programação linear, programação quadrática, programação dinâmica, programação não linear e programação inteira mista), mas técnicas de decomposição (decomposição de Benders e decomposição hierárquica) também existem na literatura e podem ser utilizadas [4] ,[5], [6]. Além de buscarem a solução ótima, todas essas técnicas usualmente necessitam de um tempo computacional alto, devido à alta complexidade do problema.

Para amenizar a alta demanda computacional, métodos heurísticos ou meta-heurísticos podem ser utilizados. Eles realizam, passo a passo, procuras locais orientadas por regras e/ou sensibilidades para gerar, avaliar e selecionar alternativas de expansão. O processo se repete até o algoritmo não conseguir encontrar um plano melhor segundo o critério estabelecido na função objetivo do problema. O uso desses métodos é bastante atrativo, pois eles encontram boas soluções viáveis, não necessariamente ótimas, demandando um esforço computacional baixo quando comparado com os métodos de otimização matemática [2] .

Os principais métodos heurísticos existentes para resolver o problema de expansão da transmissão são baseados em algoritmos genéticos, modelos orientados a objeto, teoria dos jogos, teoria dos conjuntos Fuzzy, GRASP, sistemas especialistas e recozimento simulado (*simulated annealing*) [3], [7].

2.2 Tratamento de Incertezas e Critérios de Segurança

A respeito do tratamento de incertezas, os modelos computacionais podem lidar com elas de diferentes formas. Os modelos classificados como determinísticos não chegam a considerar incertezas na solução do problema. Já os modelos estocásticos podem incorporar incertezas internas (relacionadas a disponibilidade dos equipamentos do sistema) e externas (projeções de preço de combustíveis, hidrologia, cenários de geração de renováveis etc.) ao problema, gerando uma solução mais robusta a essas incertezas no futuro [2].

Critérios de segurança também podem ser modelados ao problema [8], como por exemplo os critérios N-K. Nesses critérios, o sistema elétrico deve ser capaz de atender plenamente sua carga sem sobrecarregar nenhum circuito, mesmo na ocorrência de K contingências simples em quaisquer circuitos do sistema. Isso naturalmente conduz à adição de mais circuitos ao plano final de expansão, aumentando a robustez da solução, porém tornando a solução mais cara.

2.3 Tratamento do Horizonte de Planejamento

Além das classificações já mencionadas, o planejamento da expansão da transmissão pode ser definido, de acordo com o tratamento do horizonte de planejamento, como estático ou dinâmico. O planejamento é considerado estático quando o plano é determinado para uma situação futura única (um ano do horizonte de estudo, por exemplo), ou seja, o planejador não está interessado em saber quando os circuitos determinados pelo plano devem ser adicionados, apenas quais. Trata-se de um planejamento razoável para horizontes de estudo curtos [3].

Porém, quando o horizonte de estudo é longo, o planejamento dinâmico é o mais indicado. Nele, múltiplas etapas são consideradas, ou seja, decide-se não apenas quais circuitos devem ser construídos no sistema, mas também quando esses circuitos devem ser construídos dentro do horizonte de estudo, tornando-o bastante complexo e, conseqüentemente, requerendo

um enorme esforço computacional para resolvê-lo. Uma forma de simplificar o problema dinâmico é dividi-lo em uma sequência de subproblemas estáticos, também chamado de planejamento pseudo-dinâmico. Há alguns métodos existentes para a realização o planejamento pseudo-dinâmico, que serão listados a seguir. Para informações mais detalhadas sobre esses métodos, o leitor deve consultar [9].

O primeiro é o método *forward*. Ele consiste em realizar o planejamento estático ano a ano (etapa a etapa), avançando no tempo, começando do primeiro ano do horizonte de estudo. Para isso o planejamento estático de cada ano considera como fixos os reforços na transmissão definidos nos anos anteriores.

Outro método existente é o *backward* que resolve a expansão da transmissão para o último ano do horizonte de estudo primeiro e, depois tentar antecipar a entrada dos circuitos adicionados nesse último ano resolvendo o planejamento estático para os anos intermediários na sequência inversa do tempo. Se os circuitos adicionados no último ano não eliminarem as violações na operação dos anos intermediários, o método necessita de mais circuitos além dos já adicionados, que serão definidos na resolução dos planejamentos estáticos para esses anos intermediários que apresentaram violação.

Também existe o método *forward-backward*, que consiste em um uso sistemático dos dois métodos mencionados acima com o intuito de encontrar um plano mais consistente e econômico. Basicamente, o método subdivide o processo de solução estática dos anos do horizonte de estudo em direções *forward* e *backward* e faz comparações entre os resultados gerados em cada iteração.

2.4 Sistemas de Transmissão Regionais

Finalmente, uma última forma de planejamento pode ser definida para sistemas de grande porte, constituído por vários subsistemas/países interligados entre si. Esses subsistemas normalmente são definidos de acordo com os gargalos de transmissão existentes no sistema, que restringem a importação e exportação de energia entre regiões, levando essas regiões a obterem custos marginais operativos distintos. Isso justifica a expansão das interconexões não ser feita em conjunto com a expansão da transmissão, e sim com a expansão da geração, na metodologia hierárquica descrita na subseção 1.1, já que a troca de energia entre regiões influencia diretamente nas decisões de investimento em geradores.

Com base na abordagem explicitada anteriormente, o planejamento pode ser realizado por região, onde a construção dos circuitos é determinada para cada subsistema ou país individualmente. Nesse caso, as interconexões entre os subsistemas ou países são representadas como injeções nas barras terminais, as quais dependem do sentido do fluxo de potência. Como as decisões de investimento em interconexões já foram definidas a priori, considerar os subsistemas isolados com os intercâmbios caracterizados por injeções de potência em cada cenário de despacho se torna uma simplificação aceitável já que essas injeções foram previamente calculadas de forma a otimizar as trocas de energia entre os subsistemas do ponto de vista da minimização do custo operativo do despacho hidrotérmico de longo prazo.

Em contrapartida, a expansão poderia ser feita de forma integrada. Neste caso, ela é feita para o sistema inteiro, considerando todas as regiões integradas. Dependendo da dimensão do sistema a ser expandido, esse método de solução pode requerer um esforço computacional demasiadamente alto, caso o problema seja solúvel em tempo hábil. Além disso, a avaliação das sobrecargas em uma determinada região do sistema, muito possivelmente não apresenta efeito representativo em outra. Em outros casos, o planejamento integrado de uma rede complexa e interconectada é inviável por questões políticas, como países interligados, onde cada país está interessado em expandir sua própria rede de acordo com suas próprias metodologias e critérios técnicos e regulatórios. Em resumo, a delimitação das regiões depende de aspectos técnicos, locais, políticos e econômicos.

3 Formulação Matemática do Problema de Expansão da Transmissão

Nessa seção serão definidos os conceitos utilizados na formulação matemática do problema de expansão da transmissão ([2] e [10]) e será apresentado a formulação final do problema através de diferentes modelos.

3.1 Conceitos Relevantes para a Formulação do Problema

3.1.1 Fluxo de Potência Linearizado ou Fluxo de Potência DC

Para o planejamento da expansão da transmissão, considera-se apenas o sistema a ser expandido em regime permanente e utiliza-se do fluxo de potência linearizado, que consiste em uma linearização do fluxo de potência ativa e desconsideração do fluxo de potência reativa, ao invés do fluxo de potência não-linear (fluxo AC) pelos seguintes motivos [2] :

- a. A razão entre resistência e reatância (R/X) das linhas de transmissão aéreas geralmente é bem pequena, podendo-se desprezar a resistência dos circuitos do sistema.
- b. O fluxo linearizado evita problemas de convergência que são comuns em problemas não-lineares.
- c. O suporte de potência reativa de um sistema pode ser realizado localmente através de compensadores shunt e possui custos menores que os custos de investimento de circuitos. Portanto, os fluxos de potência reativa nos circuitos de transmissão podem ser ignorados.
- d. *Solvers* comerciais de otimização que utilizam programação inteira mista podem ser utilizados para resolver o problema.

A equação do fluxo de potência ativo no ramo km é dado pela fórmula [11]:

$$P_{km} = g_{km}V_k^2 - g_{km}V_kV_m \cos(\theta_{km}) - b_{km}V_kV_m \sin(\theta_{km}) \quad (1)$$

Na qual,

$$g_{km} = \frac{r_{km}}{r_{km}^2 + x_{km}^2} \quad (2)$$

$$b_{km} = \frac{-x_{km}}{r_{km}^2 + x_{km}^2} \quad (3)$$

$$\theta_{km} = \theta_k - \theta_m \quad (4)$$

r_{km} - Resistência do ramo km .

x_{km} - Reatância do ramo km .

V_k - Tensão na barra k .

V_m - Tensão na barra m .

θ_k - Ângulo da barra k .

θ_m - Ângulo da barra m .

Desprezando as perdas ($r_{km} = 0$) e considerando que a diferença de fase entre as barras k e m é pequena ($\text{sen}(\theta_{km}) \approx \theta_{km}$) e que as tensões nas barras são próximas de 1 pu ($V_k = V_m \approx 1$ pu), chegamos na seguinte equação do fluxo de potência linearizado [11]:

$$P_{km} = \frac{\theta_{km}}{x_{km}} \quad (5)$$

3.1.2 Primeira Lei de Kirchhoff

Representa apenas o balanço de potência ativa em cada barra já que somente essa potência é levada em conta na formulação. Ela pode ser escrita da seguinte forma:

$$\sum_{i \in \Omega_k} f_i + g_k = d_k, \forall k = 1, \dots, K \quad (6)$$

Em que,

Ω_k - Conjunto dos circuitos diretamente conectados à barra k .

f_i - Fluxo de potência ativa no circuito i .

g_k - Geração na barra k .

d_k - Demanda na barra k .

K - Número de barras do sistema.

Pode-se acrescentar uma variável de corte de carga por barra à primeira lei de Kirchhoff. A presença dessa variável será importante na formulação final do problema. Portanto:

$$\sum_{i \in \Omega_k} f_i + g_k = d_k - r_k, \forall k = 1, \dots, K \quad (7)$$

Sendo,

r_k - Valor do corte de carga na barra k .

Naturalmente, o valor de corte de carga em uma barra deve ser menor ou igual ao valor da demanda na mesma barra, ou seja:

$$r_k \leq d_k \quad (8)$$

3.1.3 Segunda Lei de Kirchhoff

A segunda lei de Kirchhoff pode ser simplificada através de uma forma linear, com base no fluxo de potência linearizado (5):

$$f_i = \gamma_i(\theta_{k_i} - \theta_{m_i}) \quad (9)$$

Em que,

γ_i - Susceptância do circuito i .

θ_{k_i} - Ângulo da barra terminal k conectada ao circuito i .

θ_{m_i} - Ângulo da barra terminal m conectada ao circuito i .

3.1.4 Limites de Fluxo nos Circuitos

O fluxo de potência ativa nos circuitos deve estar limitado a capacidade de cada circuito:

$$-\bar{f}_i \leq f_i \leq \bar{f}_i \quad (10)$$

Na qual,

\bar{f}_i - Capacidade do circuito i .

3.1.5 Múltiplos cenários de despacho

Quando se deseja considerar múltiplos cenários de despacho, as equações da primeira lei de Kirchhoff, segunda lei de Kirchhoff e dos limites de fluxo nos circuitos podem ser reescritas da seguinte forma:

$$\sum_{i \in \Omega_k} f_i^n + g_k^n = d_k^n - r_k^n, \forall k = 1, \dots, K \quad (11)$$

$$f_i^n = \gamma_i (\theta_{k_i}^n - \theta_{m_i}^n) \quad (12)$$

$$-\bar{f}_i \leq f_i^n \leq \bar{f}_i \quad (13)$$

Em que o sobrescrito n indica que as variáveis pertencem ao cenário de despacho n .

3.2 Formulação

Após a definição dos conceitos acima, a formulação do problema de expansão da transmissão será apresentada na sequência através dos três principais modelos existentes na literatura ([2], [10]), que se distinguem pelo nível de representação das leis de Kirchhoff na formulação.

3.2.1 O Modelo de Transportes

O problema da expansão da transmissão consiste em um problema de otimização onde se deseja eliminar cortes de carga e sobrecargas do sistema, minimizando os custos de investimento. A maioria das variáveis que compõem o problema (ângulo das barras, fluxo nos circuitos e corte de carga nas barras) são contínuas. No entanto, a decisão de investimento em circuitos é uma decisão binária, ou seja, um circuito só pode ser construído por inteiro ou não ser construído, ocasionando que sua representação seja através de uma variável inteira. Logo,

o problema deixa de ser puramente linear para se tornar um problema inteiro, possibilitando sua formulação como um *problema de programação linear mista* ou *inteira mista* (MIP *problem*, em inglês) [12].

O problema de programação inteira mista é composto por duas partes. A primeira delas, chamada de *função objetivo*, denota a função a ser minimizada ou maximizada. A segunda parte é formada pelas *restrições* do problema, que restringem os valores das variáveis e podem ser de igualdade ou desigualdade.

A definição da função objetivo do problema de expansão não deve considerar apenas os custos de investimento. Os cortes de carga nem sempre são possíveis de serem eliminados ou podem assumir valores irrisórios, não justificando custos de investimento elevados em circuitos para eliminá-los (dado que neste modelo re-despachos não são considerados). Com isso, deve-se incluir um custo de penalização por cortes de cargas do sistema na formulação do problema, que devem ser igualmente minimizados.

Logo, a função objetivo do problema de expansão da transmissão pode ser definida da seguinte forma:

$$\min \sum_{i \in \Omega^1} c_i x_i + \delta \sum_{k=1}^K r_k \quad (14)$$

Sendo,

c_i - Custo de investimento do circuito candidato i .

x_i - Variável binária ($x_i \in \{0,1\}$) relacionada à construção ou não do circuito candidato i , também conhecida como variável de decisão de investimento.

Ω^1 - Conjunto dos circuitos candidatos.

δ - Custo de penalidade por corte de carga.

O primeiro modelo de formulação que surgiu na literatura foi o chamado *Modelo de Transportes*. Nele a segunda lei de Kirchhoff não é obedecida pelos circuitos do sistema, sendo eles existentes ou candidatos [2]. Circuitos existentes são aqueles que já pertencem ao sistema de transmissão atual. Circuitos planejados, que já estão previstos para serem construídos em

uma data futura, também podem ser contemplados e são considerados como existentes matematicamente na etapa futura a qual será submetida ao processo de planejamento. Já os circuitos candidatos são aqueles que não existem no sistema, mas fazem parte de uma lista de projetos de circuitos de onde o modelo de otimização vai tomar sua decisão de investimento selecionando quais e quando esses projetos devem ingressar ao sistema, formando o plano de expansão.

Como a segunda lei de Kirchhoff não é representada, as restrições referentes a ela não são escritas na formulação e apenas as restrições relacionadas a primeira lei de Kirchhoff ((7) e (8)) e a capacidade dos circuitos são representadas. Para circuitos existentes, a restrição de capacidade pode ser representada da seguinte forma:

$$-\overline{f}_i^0 \leq f_i^0 \leq \overline{f}_i^0, \forall i \in \Omega^0 \quad (15)$$

Em que,

Ω^0 - Conjunto dos circuitos existentes.

Sobrescrito 0 - Indica que a variável é relacionada a circuitos existentes.

Já a restrição de capacidade dos circuitos candidatos deve incluir a variável de decisão de investimento:

$$-\overline{f}_i^1 x_i \leq f_i^1 \leq \overline{f}_i^1 x_i, \forall i \in \Omega^1 \quad (16)$$

Na qual,

Sobrescrito 1 - Indica que a variável é relacionada a circuitos candidatos.

Feito isso, podemos apresentar a formulação do modelo de transportes, para um cenário de despacho:

$$\min \sum_{i \in \Omega^1} c_i x_i + \delta \sum_{k=1}^K r_k \quad (17a)$$

Sujeito a:

$$\sum_{i \in \Omega_k^0} f_i^0 + \sum_{i \in \Omega_k^1} f_i^1 + g_k = d_k - r_k, \forall k = 1, \dots, K \quad (17b)$$

$$-\bar{f}_i^0 \leq f_i^0 \leq \bar{f}_i^0, \forall i \in \Omega^0 \quad (17c)$$

$$-\bar{f}_i^1 x_i \leq f_i^1 \leq \bar{f}_i^1 x_i, \forall i \in \Omega^1 \quad (17d)$$

$$r_k \leq d_k \quad (17e)$$

Pode-se também formulá-lo para múltiplos cenários de despacho, como é mostrado a seguir:

$$\min \sum_{i \in \Omega^1} c_i x_i + \delta \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^K r_k^n \quad (18a)$$

Sujeito a:

$$\sum_{i \in \Omega_k^0} f_i^{0,n} + \sum_{i \in \Omega_k^1} f_i^{1,n} + g_k^n = d_k^n - r_k^n, \forall k = 1, \dots, K \quad (18b)$$

$$-\bar{f}_i^0 \leq f_i^{0,n} \leq \bar{f}_i^0, \forall i \in \Omega^0 \quad (18c)$$

$$-\bar{f}_i^1 x_i \leq f_i^{1,n} \leq \bar{f}_i^1 x_i, \forall i \in \Omega^1 \quad (18d)$$

$$r_k^n \leq d_k^n \quad (18e)$$

Em que,

N - Número de cenários de despacho.

Vale ressaltar que a variável de decisão de investimento x_i é a responsável por acoplar todos os cenários de despacho, obrigando a resolução de problema levar em consideração todos eles. Dessa forma, a solução do problema se torna robusta frente a diferentes cenários de despacho.

Esse modelo de formulação é considerado bem simplificado e, por isso, possui o melhor desempenho computacional quando comparado aos outros modelos mostrados a seguir [2].

3.2.2 O Modelo Linear Híbrido

A formulação do *Modelo Linear Híbrido* é semelhante ao modelo de transportes, com uma única diferença: a segunda lei de Kirchhoff agora é obedecida, porém apenas pelos circuitos existentes, o que leva a representação da seguinte restrição na formulação:

$$f_i^0 = \gamma_i^0(\theta_{k_i} - \theta_{m_i}), \forall i \in \Omega^0 \quad (19)$$

Com isso, a formulação para um único cenário de despacho é mostrada a seguir:

$$\min \sum_{i \in \Omega^1} c_i x_i + \delta \sum_{k=1}^K r_k \quad (20a)$$

Sujeito a:

$$\sum_{i \in \Omega_k^0} f_i^0 + \sum_{i \in \Omega_k^1} f_i^1 + g_k = d_k - r_k, \forall k = 1, \dots, K \quad (20b)$$

$$f_i^0 = \gamma_i^0(\theta_{k_i} - \theta_{m_i}), \forall i \in \Omega^0 \quad (20c)$$

$$-f_i^0 \leq f_i^0 \leq \bar{f}_i^0, \forall i \in \Omega^0 \quad (20d)$$

$$-f_i^1 x_i \leq f_i^1 \leq \bar{f}_i^1 x_i, \forall i \in \Omega^1 \quad (20e)$$

$$r_k \leq d_k \quad (20f)$$

E para múltiplos cenários de despacho:

$$\min \sum_{i \in \Omega^1} c_i x_i + \delta \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^K r_k^n \quad (21a)$$

Sujeito a:

$$\sum_{i \in \Omega_k^0} f_i^{0,n} + \sum_{i \in \Omega_k^1} f_i^{1,n} + g_k^n = d_k^n - r_k^n, \forall k = 1, \dots, K \quad (21b)$$

$$f_i^{0,n} = \gamma_i^{0,n}(\theta_{k_i}^n - \theta_{m_i}^n), \forall i \in \Omega^0 \quad (21c)$$

$$-f_i^{0,n} \leq f_i^{0,n} \leq \bar{f}_i^{0,n}, \forall i \in \Omega^0 \quad (21d)$$

$$-f_i^{1,n} x_i \leq f_i^{1,n} \leq \bar{f}_i^{1,n} x_i, \forall i \in \Omega^1 \quad (21e)$$

$$r_k^n \leq d_k^n \quad (21f)$$

Esse modelo apresenta resultados mais precisos do que o anterior por representar ao menos a segunda lei de Kirchhoff para circuitos existentes, que geralmente é superior ao número de circuitos candidatos de um sistema [2]

3.2.3 O Modelo Linear Disjuntivo

O modelo considerado o mais completo na literatura é o chamado *Modelo Linear Disjuntivo*. Nele, a segunda lei de Kirchhoff deve ser obedecida para todos os circuitos, sendo eles existentes ou candidatos. A restrição relacionada a segunda lei de Kirchhoff para circuitos candidatos, intuitivamente, pode ser escrita do seguinte modo:

$$f_i^1 = \gamma_i^1 x_i (\theta_{k_i} - \theta_{m_i}), \forall i \in \Omega^1 \quad (22)$$

Contudo, o produto das variáveis x_i e $(\theta_{k_i} - \theta_{m_i})$ introduz uma não linearidade na equação, impossibilitando a solução do problema por métodos lineares. Para evitar isso, reescreve-se a equação acima através de uma formulação disjuntiva:

$$-M(1 - x_i) \leq f_i^1 - \gamma_i^1 (\theta_{k_i} - \theta_{m_i}) \leq M(1 - x_i), \forall i \in \Omega^1 \quad (23)$$

Em que M , conhecido por “big M”, consiste em uma constante com valor bastante alto (idealmente infinito). Se $x_i = 1$, ou seja, o circuito candidato i é dado como construído, a inequação acima se transforma na segunda lei de Kirchhoff para o mesmo. Caso $x_i = 0$, f_i^1 também será igual a 0 e a restrição acima é relaxada pelo valor de M . Essa relaxação é importante pois evita que a abertura angular entre as barras terminais do circuito candidato não construído $(\theta_{k_i} - \theta_{m_i})$ fique restringida pela representação deste circuito que não pertence ao sistema.

Um valor de M muito elevado pode levar o problema a ser mal condicionado, do ponto de vista computacional, dificultando a solução do mesmo. Logo, essa constante deve assumir o menor valor possível sem limitar artificialmente a abertura angular entre as barras terminais dos circuitos candidatos. Para encontrar esse menor valor, vamos reescrever a formulação disjuntiva (23) como a seguir:

$$-M_r(1 - x_i) \leq f_i^1 - \gamma_i^1 (\theta_{k_i} - \theta_{m_i}) \leq M_r(1 - x_i), \forall i \in \Omega^1 \cap \Omega_r, \forall r = 1, \dots, R \quad (24)$$

Sendo,

Ω_r - Conjunto dos circuitos candidatos pertencentes à faixa de passagem r .

M_r - Valor de M da faixa de passagem r .

R - Número de faixas de passagem do sistema.

Considerando $f_i^1 = 0$, quando $x_i = 0$, obtemos:

$$-\gamma_i^1(\theta_{k_i} - \theta_{m_i}) \leq M_r \quad (25)$$

$$-\gamma_i^1(\theta_{k_i} - \theta_{m_i}) \geq -M_r \quad (26)$$

Agora iremos analisar dois casos. Primeiramente, vamos considerar que o circuito candidato i é uma duplicação de um circuito existente. Substituindo (19) em (15) temos:

$$-\frac{\overline{f}_i^0}{\gamma_i^0} \leq (\theta_{k_i} - \theta_{m_i}) \leq \frac{\overline{f}_i^0}{\gamma_i^0} \quad (27)$$

Comparando (25) e (26) com (27), obtém-se a seguinte relação:

$$M_r \geq \gamma_i^1 \frac{\overline{f}_i^0}{\gamma_i^0} \quad (28)$$

Na qual \overline{f}_i^0 e γ_i^0 são referentes ao circuito existente que apresenta as mesmas barras terminais do circuito candidato.

Já o segundo caso considera que o circuito candidato i não é uma duplicação de um circuito existente. Nesse caso não há um circuito existente que conecta as barras terminais do circuito candidato diretamente. Então deve-se encontrar o conjunto de circuitos existentes que conectam essas barras terminais e compõem o menor caminho elétrico (maior susceptância), ou seja, o menor somatório dos valores $\frac{\overline{f}_i^0}{\gamma_i^0}$ de cada circuito pertencente ao conjunto. Portanto, nesse caso:

$$M_r \geq \gamma_i^1 W_{min} \quad (29)$$

Na qual W_{min} é o menor somatório mencionado acima.

Finalmente, com a inclusão da restrição (24), podemos apresentar a formulação final do modelo disjuntivo para um único cenário de despacho:

$$\min \sum_{i \in \Omega^1} c_i x_i + \delta \sum_{k=1}^K r_k \quad (30a)$$

Sujeito a:

$$\sum_{i \in \Omega_k^0} f_i^0 + \sum_{i \in \Omega_k^1} f_i^1 + g_k = d_k - r_k, \forall k = 1, \dots, K \quad (30b)$$

$$f_i^0 = \gamma_i^0 (\theta_{k_i} - \theta_{m_i}), \forall i \in \Omega^0 \quad (30c)$$

$$-M_r(1 - x_i) \leq f_i^1 - \gamma_i^1 (\theta_{k_i} - \theta_{m_i}) \leq M_r(1 - x_i), \forall i \in \Omega^1 \cap \Omega_r; \forall r = 1, \dots, R \quad (30d)$$

$$-\bar{f}_i^0 \leq f_i^0 \leq \bar{f}_i^0, \forall i \in \Omega^0 \quad (30e)$$

$$-\bar{f}_i^1 x_i \leq f_i^1 \leq \bar{f}_i^1 x_i, \forall i \in \Omega^1 \quad (30f)$$

$$r_k \leq d_k \quad (30g)$$

E para múltiplos cenários de despacho:

$$\min \sum_{i \in \Omega^1} c_i x_i + \delta \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^K r_k^n \quad (31a)$$

Sujeito a:

$$\sum_{i \in \Omega_k^0} f_i^{0,n} + \sum_{i \in \Omega_k^1} f_i^{1,n} + g_k^n = d_k^n - r_k^n, \forall k = 1, \dots, K \quad (31b)$$

$$f_i^{0,n} = \gamma_i^{0,n} (\theta_{k_i}^n - \theta_{m_i}^n), \forall i \in \Omega^0 \quad (31c)$$

$$-M_r(1 - x_i) \leq f_i^{1,n} - \gamma_i^{1,n} (\theta_{k_i}^n - \theta_{m_i}^n) \leq M_r(1 - x_i), \forall i \in \Omega^1 \cap \Omega_r; \forall r = 1, \dots, R \quad (31d)$$

$$-\bar{f}_i^0 \leq f_i^{0,n} \leq \bar{f}_i^0, \forall i \in \Omega^0 \quad (31e)$$

$$-\bar{f}_i^1 x_i \leq f_i^{1,n} \leq \bar{f}_i^1 x_i, \forall i \in \Omega^1 \quad (31f)$$

$$r_k^n \leq d_k^n \quad (31g)$$

4 Resolução do Problema de Expansão da Transmissão para Sistemas Regionais

Essa seção propõe uma forma de resolver o problema de expansão da transmissão de sistemas compostos por mais de um subsistema/país interconectados entre si. A forma proposta é dividida em dois métodos de resolução do problema, sendo que o primeiro (mais simplificado) auxilia o segundo na busca da solução ótima. Tanto o procedimento da resolução do problema de expansão pelos dois métodos quanto a integração entre eles serão descritas nessa seção.

4.1 Características da Resolução

Em relação aos distintos aspectos e formulações do planejamento de expansão da transmissão apresentados nos capítulos 2 e 3, a forma de resolução proposta possui as seguintes características com suas devidas justificativas:

- a. Tratamento do horizonte de estudo: O tratamento do horizonte de estudo é feito de forma pseudo-dinâmica, considerando etapas anuais e adotando o método *forward*. Essa é a forma que se aproxima mais do planejamento de sistemas de transmissão reais, onde a expansão é realizada para cada ano, na sequência do tempo, considerando a expansão de anos anteriores como fixa.
- b. Tratamento de incertezas: Múltiplos cenários de despacho podem ser considerados no problema para que a variabilidade da geração, causada pela incerteza na disponibilidade dos recursos naturais utilizados pela mesma, seja capturada durante o planejamento. Dessa forma, a solução final será robusta mediante a essa incerteza.
- c. Modelo de formulação: O modelo de formulação utilizado é o modelo linear disjuntivo, por ser o mais preciso dentre os três apresentados na subseção 3.2. Nele, a segunda lei de Kirchhoff é respeitada tanto pelos circuitos existentes como pelos circuitos candidatos.

- d. Solução por região/integrada: O planejamento é realizado por região, ou seja, para cada subsistema/país individualmente. Trata-se de uma forma de resolução mais rápida computacionalmente, comparado a resolução integrada, e menos invasiva, já que os países envolvidos no planejamento regularmente possuem políticas de expansão da transmissão distintas para realizar sua própria expansão. Além do mais, a distribuição de fluxo nos circuitos de um subsistema ou país é pouco afetado com a entrada de um circuito em uma região distante geograficamente dela. Logo a expectativa é que a solução regional não destoe expressivamente da solução integrada (caso fosse possível sua aplicação, dados os impasses políticos e regulatórios). Lembrando que representar as interconexões por injeções fixas é uma simplificação plausível, já que estas foram calculadas de forma a otimizar as trocas de energia entre subsistemas durante a expansão da geração.

- e. Método de resolução: Finalmente, utiliza-se da otimização matemática baseada em programação inteira mista e decomposição de Benders para resolver o problema. Devido a necessidade de se contemplar grandes números de cenários de despacho no problema, para a expansão sob incerteza, e ao tamanho expressivo das redes de transmissão atuais, os problemas de programação inteira mista podem se tornar muito grandes e, conseqüentemente, insolúveis em tempos aceitáveis. Para isso, utiliza-se heurísticas em conjunto com a decomposição de Benders durante a resolução para reduzir significativamente o esforço computacional. O algoritmo do método de resolução será descrito detalhadamente na sequência.

4.2 Algoritmo do Método de Resolução

O Algoritmo de solução do problema pode ser dividido em duas fases: Heurística e Decomposição. Na fase Heurística, o problema de expansão é resolvido através de uma heurística “gulosa”, gerando uma solução viável, não necessariamente ótima, e cortes de viabilidade. Na fase Decomposição, os cortes gerados na primeira fase são utilizados para um “hot start” e o problema é resolvido por decomposição de Benders para encontrar a solução ótima. As duas etapas são descritas detalhadamente a seguir.

4.2.1 Fase Heurística

Os dados de entrada necessários para a execução do algoritmo são os seguintes:

- Cenários de despacho a serem considerados, com seus respectivos valores de carga e geração por barra do sistema.
- Topologia da Rede
- Lista de circuitos candidatos, com os valores custos de investimento de cada circuito.
- Reatância e capacidade nominal de todos os circuitos.

Em relação ao tap dos transformadores, eles são fixados em 1 pu.

Conhecendo todos esses dados, o algoritmo pode ser inicializado pela fase Heurística, que é dividida em sete etapas:

- Realiza-se uma análise de severidade para todos os cenários de despacho considerando apenas a rede existente (x_i igual a zero para todos dos circuitos candidatos). Essa análise consiste em calcular o fluxo de potência ótimo, minimizando o valor total de corte de carga do sistema, para cada cenário individualmente. A formulação do fluxo de potência ótimo para cada cenário é mostrada abaixo:

$$z^n = \min \sum_{k=1}^K r_k^n \quad (32a)$$

Sujeito a:

$$\sum_{i \in \Omega_k^0} f_i^{0,n} + g_k^n = d_k^n - r_k^n, \forall k = 1, \dots, K \quad (32b)$$

$$f_i^{0,n} = \gamma_i^{0,n} (\theta_{k_i}^n - \theta_{m_i}^n), \forall i \in \Omega^0 \quad (32c)$$

$$-\bar{f}_i^0 \leq f_i^{0,n} \leq \bar{f}_i^0, \forall i \in \Omega^0 \quad (32d)$$

$$r_k^n \leq d_k^n \quad (32e)$$

Sendo,

z^n – Corte de carga total do sistema para o cenário de despacho n .

Observa-se que o problema de fluxo de potência ótimo apresenta as mesmas restrições do modelo de transportes, pois essa primeira análise considera apenas os circuitos existentes

no sistema. Para resolver o problema supracitado, técnicas de programação linear são utilizados [11]. Posteriormente, dentre todos os N cenários de despacho, são agrupados os cenários, classificados como severos, que obtiveram $z^n > 0$, formando o conjunto S . Em seguida, aplica-se algum critério “guloso” para selecionar os cenários mais críticos dentre os severos e formar o conjunto C . Por exemplo, aplicando o critério de maior corte de carga, são selecionados os cenários que possuem os maiores valores de z^n dentre os cenários pertencentes a S , para formar o conjunto C . O número máximo de cenários a serem selecionados deve ser pré-definido e, portanto, o conjunto C possui tamanho limitado.

Caso não haja cenários severos, o algoritmo para pois não há necessidade de investimento em circuitos.

- (ii) Em seguida o problema de expansão é formulado com base no modelo linear disjuntivo, contemplando apenas os C cenários selecionados em (i). Depois o problema linear misto é resolvido pelo método *Branch-and-Bound* [12] e os reforços de transmissão decididos são adicionados à rede e fixados.
- (iii) Dada a rede de transmissão reforçada em (ii), uma nova análise de severidade é efetuada para os cenários pertencentes a $(S - C)$, considerando os circuitos candidatos construídos em (ii) como existentes, e os cenários pertencentes aos conjuntos S e C são atualizados. Caso o número de cenários pertencentes a S ainda seja maior que zero, a etapa (iv) é executada. Senão, segue-se para etapa (v).
- (iv) Calculam-se os cortes de viabilidade que serão utilizados no “*hot start*” da decomposição. Para isso, devem-se capturar as variáveis duais [12] referentes às restrições (32d) e (32f) das análises de severidade dos cenários $(S - C)$, realizadas em (iii). A definição desses cortes pode ser encontrada na próxima subseção. Retorna-se para a etapa (ii).
- (v) Realiza-se a análise de severidade para todos os cenários novamente, considerando também as decisões de investimento até então como existentes, e os conjuntos S e C são atualizados. Se o número de cenários de S for maior que zero, retorna-se para a etapa (ii). Caso contrário, segue-se para a etapa (vi).

- (vi) Uma análise de redundância é feita, em que reforços de transmissão considerados redundantes são retirados do plano de expansão. Isso é realizado eliminando cada reforço do plano por ordem decrescente de custo de investimento, caso a remoção não cause sobrecargas na rede para todos os cenários de despacho.

A **Figura 2** abaixo ilustra todo o processo descrito acima através de um fluxograma.

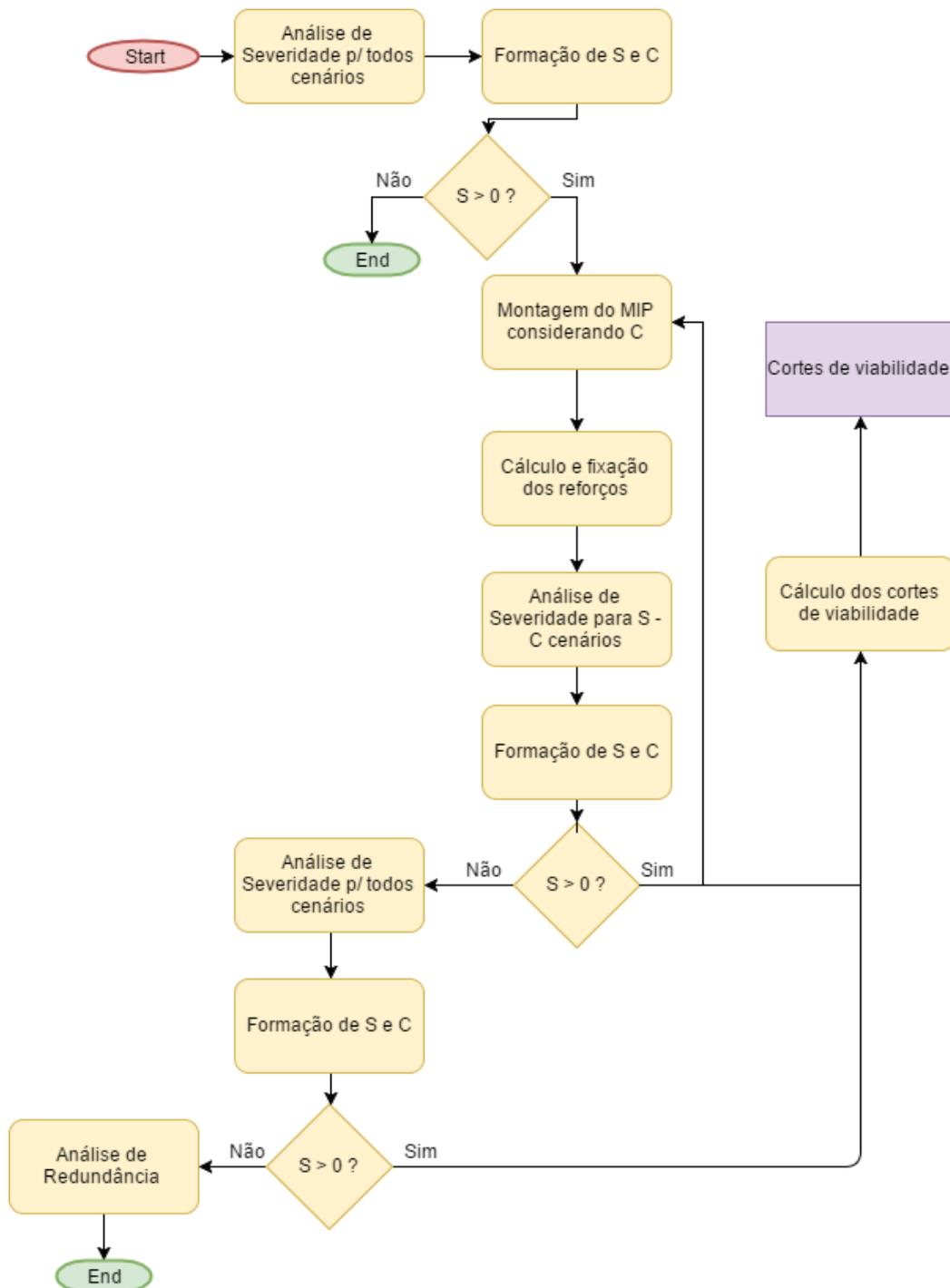


Figura 2 – Fase Heurística

Fica evidente a característica heurística do algoritmo no processo de seleção dos cenários críticos, na resolução do problema considerando apenas esses cenários e na fixação dos investimentos já calculados em iterações anteriores. Apesar de não garantir otimalidade, o processo fornece uma solução viável e de boa qualidade em um tempo computacional bastante reduzido, além de gerar cortes de viabilidade utilizados na próxima fase.

4.2.2 Fase Decomposição

Na fase Decomposição, existem dois tipos de problemas: o problema de investimento, chamado de problema mestre, e os problemas de viabilidade, chamados de problemas escravos. O problema de investimento considera um número reduzido de cenários de despacho e calcula os reforços de transmissão em cada iteração, minimizando os custos de investimento e penalidades por corte de carga. Por outro lado, cada problema escravo é formulado considerando apenas um cenário de despacho, recebe as decisões de investimento geradas pelo problema mestre e calcula um corte de viabilidade, que será adicionado ao problema mestre, também em cada iteração. Esse processo se repete até que nenhum cenário apresente corte de carga com os reforços de transmissão decididos pelo problema mestre. A **Figura 3** abaixo ilustra esse processo iterativo:

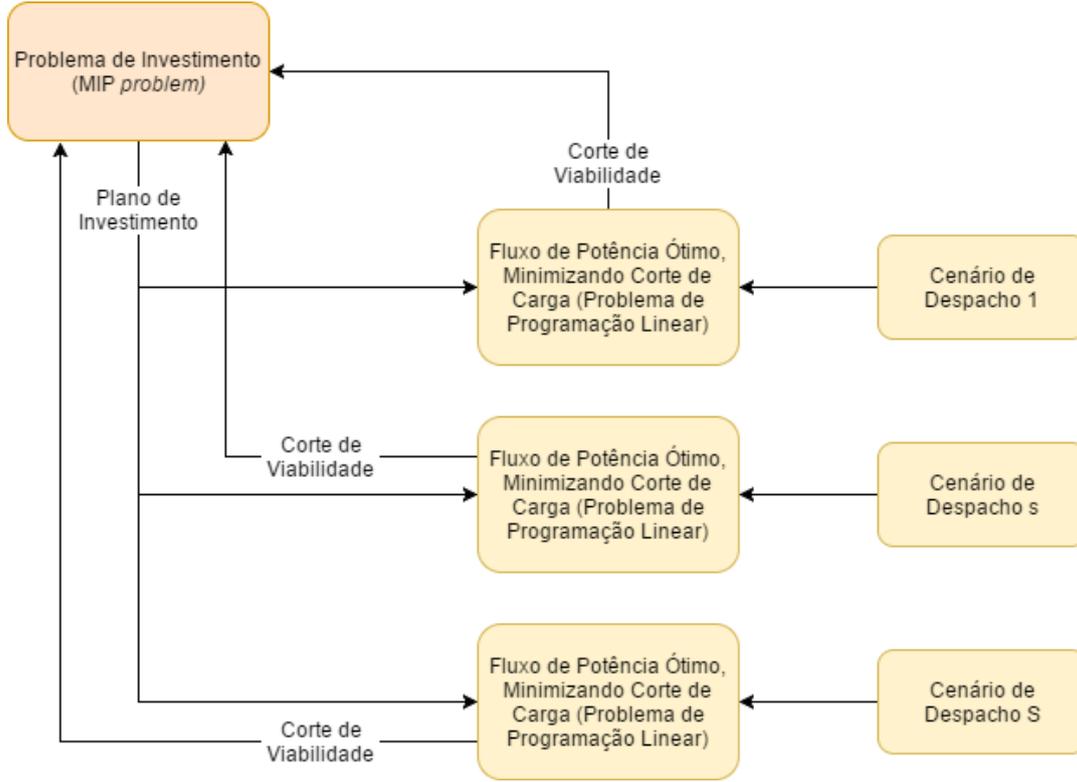


Figura 3 - Decomposição Aplicada na Expansão da Transmissão

Em cada iteração, os cortes de viabilidade fornecem informações ao problema mestre que o ajudam a decidir quanto ao conjunto de reforços de transmissão de mínimo custo que eliminam cortes de carga para os cenários considerados nos problemas escravos.

As formulações dos problemas escravos e mestre, com base no modelo linear disjuntivo, são exibidas a seguir:

- Problema de viabilidade (escravo):

$$z_p^n = \min \sum_{k=1}^K r_k^n \quad (33a)$$

Sujeito a:

$$\sum_{i \in \Omega_k^0} f_i^{0,n} + \sum_{i \in \Omega_k^1} f_i^{1,n} + g_k^n = d_k^n - r_k^n, \forall k = 1, \dots, K \quad (33b)$$

$$f_i^{0,n} = \gamma_i^{0,n} (\theta_{k_i}^n - \theta_{m_i}^n), \forall i \in \Omega^0 \quad (33c)$$

$$-M_r(1 - \hat{x}_{i,p}) \leq f_i^{1,n} - \gamma_i^{1,n} (\theta_{k_i}^n - \theta_{m_i}^n) \leq M_r(1 - \hat{x}_{i,p}), \forall i \in \Omega^1 \cap \Omega_r; \forall r = 1, \dots, R \leftarrow \pi_{i,p}^{M,n} \quad (33d)$$

$$-\bar{f}_i^0 \leq f_i^{0,n} \leq \bar{f}_i^0, \forall i \in \Omega^0 \quad (33e)$$

$$-\overline{f}_i^1 \hat{x}_{i,p} \leq f_i^{1,n} \leq \overline{f}_i^1 \hat{x}_{i,p}, \forall i \in \Omega^1 \leftarrow \pi_{i,p}^{f,n} \quad (33f)$$

$$r_k^n \leq d_k^n \quad (33g)$$

Em que,

z_p^n – Corte de carga resultante com os valores da variável de investimento $\hat{x}_{i,p}$ da p -ésima iteração de Benders e cenário n .

$\hat{x}_{i,p}$ – Valor da variável de decisão de investimento do circuito candidato i gerado pelo problema de investimento na p -ésima iteração de Benders.

$\pi_{i,p}^{M,n}$ – Valor da variável dual associada à restrição (33d), do circuito candidato i , na p -ésima iteração de Benders e cenário n .

$\pi_{i,p}^{f,n}$ – Valor da variável dual associada à restrição (33f), do circuito candidato i , na p -ésima iteração de Benders e cenário n .

- Problema de investimento (mestre):

$$\min \sum_{i \in \Omega^1} c_i x_i + \delta \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^K r_k^n \quad (34a)$$

Sujeito a:

$$\sum_{i \in \Omega_k^0} f_i^{0,n} + \sum_{i \in \Omega_k^1} f_i^{1,n} + g_k^n = d_k^n - r_k^n, \forall k = 1, \dots, K; \forall n \in C \quad (34b)$$

$$f_i^{0,n} = \gamma_i^{0,n} (\theta_{k_i}^n - \theta_{m_i}^n), \forall i \in \Omega^0; \forall n \in C \quad (34c)$$

$$-M_r(1 - x_i) \leq f_i^{1,n} - \gamma_i^{1,n} (\theta_{k_i}^n - \theta_{m_i}^n) \leq M_r(1 - x_i), \forall i \in \Omega^1 \cap \Omega_r; \forall r = 1, \dots, R; \forall n \in C \quad (34d)$$

$$-\overline{f}_i^0 \leq f_i^{0,n} \leq \overline{f}_i^0, \forall i \in \Omega^0; \forall n \in C \quad (34e)$$

$$-\overline{f}_i^1 x_i \leq f_i^{1,n} \leq \overline{f}_i^1 x_i, \forall i \in \Omega^1; \forall n \in C \quad (34f)$$

$$r_k^n \leq d_k^n, \forall n \in C \quad (34g)$$

$$\hat{z}_p^n + \sum_{i \in \Omega^1} \pi_{i,p}^n (x_i - \hat{x}_{i,p}) \leq 0, \forall n \in (S - C) \quad (34h)$$

Sendo,

$$\pi_{i,p}^n = -M_r \pi_{i,p}^{M,n} + \bar{f}_i \pi_{i,p}^{f,n}, \forall n \in (S - C) \quad (35)$$

C - Conjunto dos cenários críticos considerados no problema de investimento.

S – Conjunto dos cenários severos considerados nos problemas de viabilidade.

A restrição (34h) representa os cortes de viabilidade que são adicionados ao problema de investimento em cada iteração. Definida as formulações, pode-se apresentar o algoritmo da decomposição, que pode ser dividido nas seguintes etapas:

- (i) Realiza-se uma análise de severidade para todos os cenários de despacho considerando apenas a rede existente e os conjuntos S e C são organizados da mesma forma descrita na etapa (i) da fase heurística. Caso não haja cenários severos, o algoritmo para pois não há necessidade de investimento em circuitos.
- (ii) O problema de investimento é formulado contemplando apenas os cenários pertencentes ao conjunto C . Antes de resolvê-lo, os cortes gerados na fase heurística (etapa (iv)) são adicionados ao problema mestre.
- (iii) Resolve-se o problema de investimento pelo método *Branch-and-Bound*, gerando o vetor de investimentos $\hat{x}_{i,p}$.
- (iv) Os problemas de viabilidade são formulados, sendo que cada um considera apenas um cenário pertencente ao conjunto $S-C$. Com base no vetor $\hat{x}_{i,p}$, eles são resolvidos por técnicas de programação linear.
- (v) Para os problemas escravos que apresentaram corte de carga maior que zero, são calculadas suas variáveis duais $\pi_{i,p}^{M,n}$ e $\pi_{i,p}^{f,n}$, conseqüentemente os valores de $\pi_{i,p}^n$ pela equação (35), e o algoritmo segue para a etapa (vi). Caso nenhum problema apresente corte de carga, segue-se para a etapa (vii).
- (vi) Com base nos valores de $\pi_{i,p}^n$ calculados em (iv), são adicionados os cortes de viabilidade representados pela equação (34h) ao problema mestre. Nessa etapa, uma

iteração foi realizada por completo e pode-se inicializar uma nova iteração ($p = p + 1$). Logo, o algoritmo segue para a etapa (iii) novamente.

- (vii) Uma nova análise de severidade é realizada, considerando todos os cenários de despacho novamente e as decisões de investimento até então como existentes, e os conjuntos S e C são atualizados. Caso o número de cenários pertencentes ao conjunto S for maior que zero, a solução ótima foi encontrada. Caso contrário, retorna-se para a etapa (ii).

A **Figura 4** a seguir resume o processo da fase Decomposição em um fluxograma

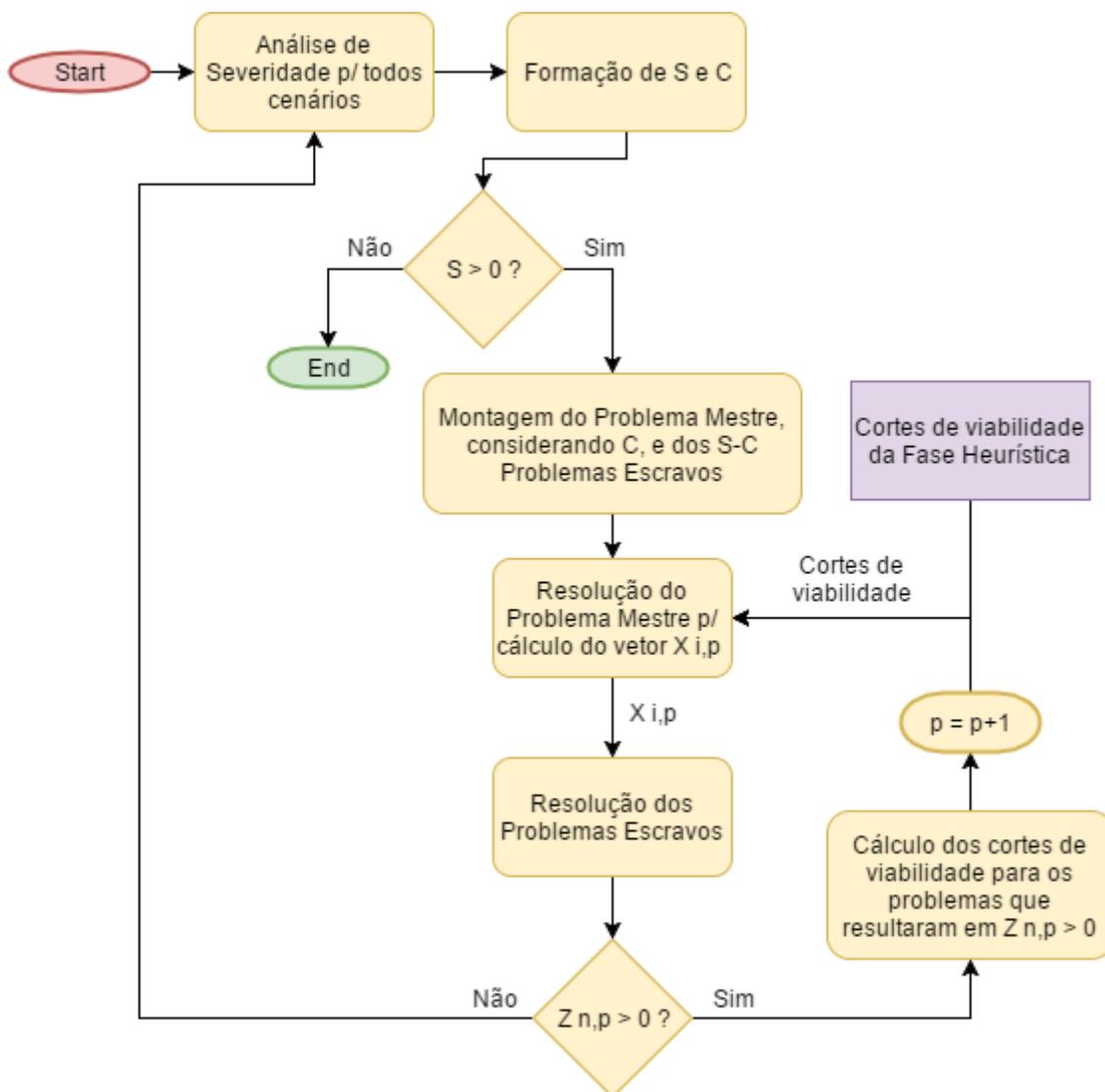


Figura 4 – Fase Decomposição

Devido à impossibilidade de se resolver um problema de programação inteira mista considerando todos os cenários de despacho em tempos computacionais admissíveis no

problema de investimento, o método de decomposição se torna uma alternativa de busca ao plano ótimo de expansão mesmo considerando um número reduzido de cenários no problema de investimento, já que o método de decomposição de Benders garante otimalidade.

Apesar disso, é plausível explicitar que a decomposição ainda demanda um esforço computacional representativo, bem maior do que o requerido na fase anterior (heurística). Isso ocorre pois os altos valores de M_r tornam os cortes de viabilidade pouco influentes na resolução do problema de investimento, levando a necessidade de um alto número de iterações para encontrar a solução ótima.

Por isso, é definido um número máximo de iterações que a fase decomposição pode realizar no algoritmo. Se esse número máximo não for suficiente para alcançar o plano de expansão ótimo, a decomposição é encerrada e a solução encontrada na fase heurística é recuperada. Dessa forma, o algoritmo se caracteriza por encontrar uma solução viável e boa a priori, de forma rápida, e depois tentar encontrar a solução ótima do problema. Caso isso não seja possível, a melhor solução, encontrada na fase heurística, é a solução final.

Vale ressaltar que o algoritmo completo é realizado para cada etapa anual do problema, fixando as decisões de investimento de anos anteriores, respeitando o método *forward*. Caso o sistema a ser expandido apresente mais de um subsistema/país, a resolução do problema para todo o horizonte de estudo é realizada para cada um deles individualmente, seguindo a lógica de resolução por região.

5 Estudo de Caso: América Central

Nessa seção será aplicado o método de resolução do problema de expansão da transmissão proposto na seção anterior em um caso exemplo. O caso escolhido foi o da América Central, por apresentar uma rede de transmissão de grande dimensão, formada pela interconexão das redes de seis países diferentes. As características desse caso serão apresentadas, juntos com os dados de entrada definidos, resultados encontrados e análises relevantes.

5.1 Características do Caso

O chamado Mercado Elétrico Regional (MER) da América Central é composto por seis países (El Salvador, Costa Rica, Panamá, Nicarágua, Guatemala e Honduras) e possui entidades que realizam o planejamento (CEAC) e operação (EOR) regional do sistema elétrico formado por esses países. Além disso, o sistema comporta uma interconexão entre Guatemala e México e um projeto de interconexão entre Panamá e Colômbia. As figuras abaixo (**Figura 5** e **Figura 6**) mostram os países pertencentes ao MER e os ramos de interconexão existentes entre eles, com suas devidas capacidades:



Figura 5 – Mercado elétrico regional da América Central [13]

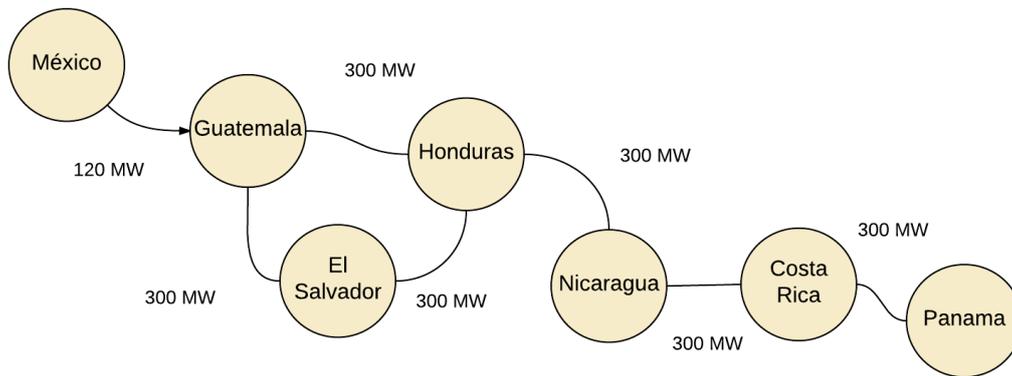


Figura 6 - Capacidades das interconexões do MER

Como visto nas figuras acima, atualmente, o MER apresenta circuitos que interconectam os seguintes países, pertencentes ao chamado projeto SIEPAC: El Salvador e Guatemala, Guatemala e Honduras, Honduras e El Salvador, Honduras e Nicarágua, Nicarágua e Costa Rica, e Costa Rica e Panamá. Como o México não faz parte do MER, ele é representado como um fornecedor de energia para Guatemala, com capacidade instalada de 120 MW (ilustrado também na **Figura 6**).

Os dados de capacidade instalada e geração média por tecnologia dos países são apresentados na **Figura 7** abaixo. Nota-se que países como Costa Rica e Panamá apresentam uma forte participação de hidrelétricas nas suas matrizes energéticas nacionais, contrastando com a relevante presença térmica na geração de países como Honduras e Nicarágua. Além disso, os gráficos mostram a elevada presença de geração renovável não convencional (eólica, solar, biomassa e geotérmica) nas matrizes energéticas de Nicarágua, Honduras, Guatemala e El Salvador. A soma das capacidades instaladas totais de cada país chega a 15 GW.

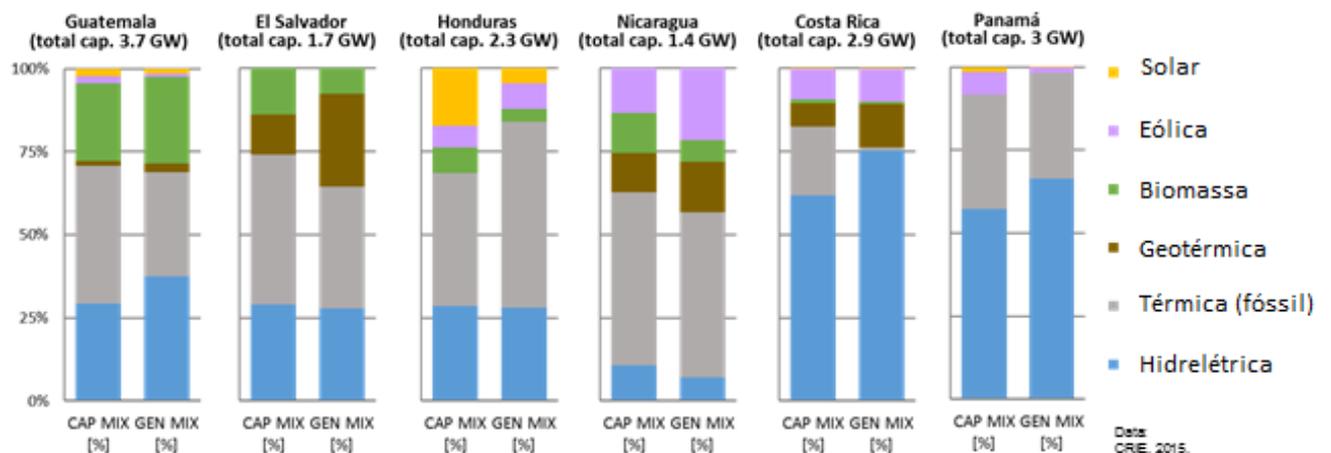


Figura 7 - Capacidade Instalada e Geração Média por Tecnologia [13]

Em relação a demanda, o gráfico abaixo (**Figura 8**) apresenta a sua projeção anual para os seis países pertencentes ao MER. Percebe-se que a demanda do Panamá possui uma projeção de crescimento maior que os demais países, tornando-se o país com maior demanda dentre todos os membros do MER a partir de 2022.

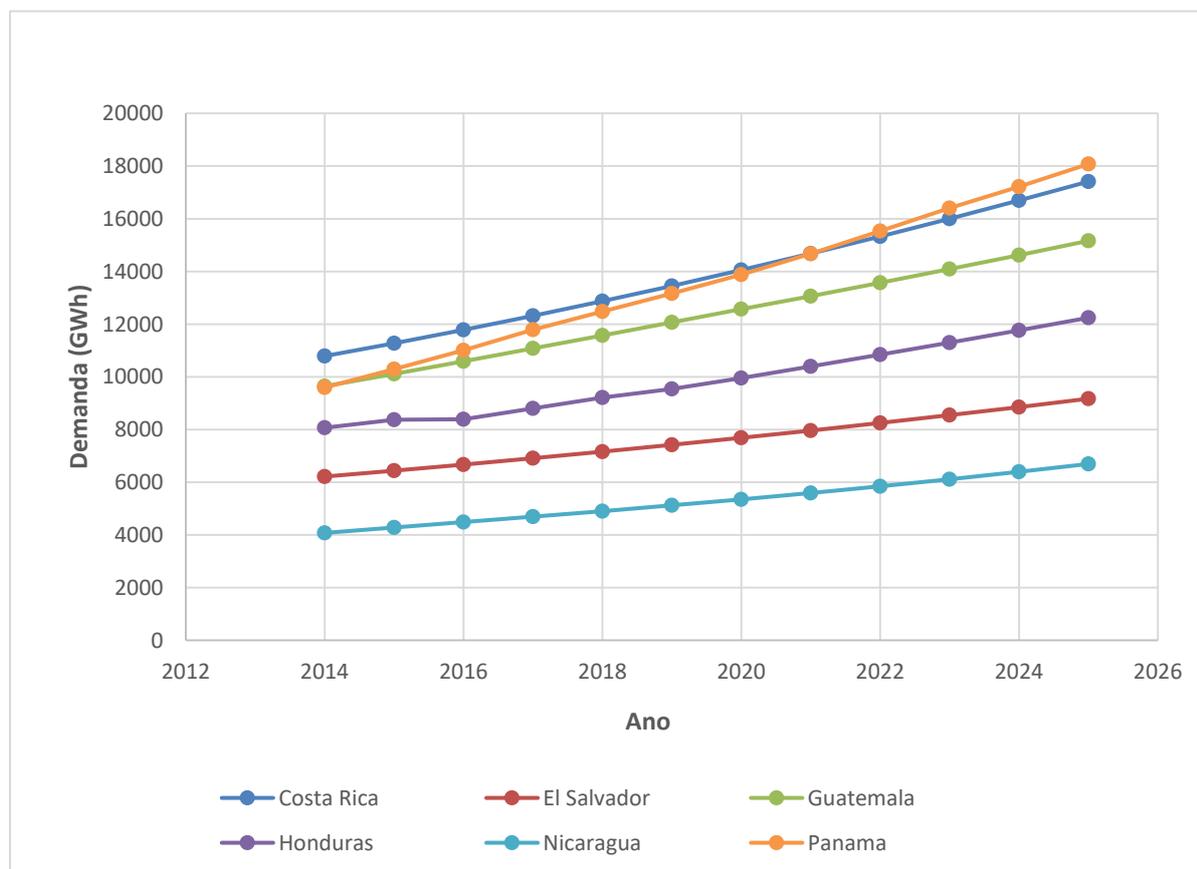


Figura 8 - Projeção de Demanda do MER

Por fim, o sistema de transmissão do MER é ilustrado na **Figura 9**. O elevado número de barras e circuitos é justificado pela representação de tensões abaixo de 115 kV e, conseqüentemente, de inúmeros transformadores. Como o cálculo da expansão da transmissão irá monitorar apenas circuitos com tensões nominais maiores ou iguais a 115 kV, a rede a ser expandida possui 710 circuitos (linhas de transmissão e transformadores, considerando circuitos existentes e candidatos), número bem menor do que o apresentado na **Figura 9**.



Figura 9 - Sistema de Transmissão do MER

5.2 Dados de Entrada

Para a execução da metodologia proposta no Capítulo 4, foi utilizado o modelo OPTNET desenvolvido pela PSR [14]. Antes das rodadas, os seguintes parâmetros de execução foram definidos:

- Número máximo de cenários críticos (tamanho do conjunto C): 5. Com esse número pequeno de cenários, os MIP's são resolvidos rapidamente.
- Número máximo de iterações na decomposição: 50. Caso a decomposição não convirja após 50 iterações, a solução encontrada na fase heurística é recuperada.
- Gap de convergência do MIP: 3%.
- Penalidade por corte de carga: 110.000 k\$/MW. Esse valor de penalidade foi definido para ser maior que o maior custo de investimento existente na lista de circuitos candidatos de forma a incentivar o algoritmo a encontrar soluções viáveis, ou seja, sem cortes de carga.
- Critério de seleção de cenários críticos: Maior valor de corte de carga.

- f. Horizonte de estudo: 2019 – 2024. A partir de 2019, nenhum projeto de circuito está programado para entrar nos sistema centro-americano, e por isso a expansão foi realizada em um período onde não houve planejamento de transmissão até então neste estudo de caso. Uma observação importante é que a expansão da geração e das interconexões já foi realizada a priori para esse caso nesse mesmo período, seguindo a metodologia hierárquica explicitada na subseção 1.1.
- g. Circuitos a serem monitorados: Com tensão maior ou igual a 115kV. Para os circuitos abaixo desse critério, os limites de capacidade não são considerados na formulação do problema.

Os cenários de despacho a serem considerados foram gerados pelo SDDP, modelo de simulação estocástica da operação de sistemas elétricos da PSR [15], que calcula o despacho de mínimo custo operativo a longo prazo. No total, foram gerados 1500 cenários de despacho por ano, sem considerar a rede de transmissão, mas respeitando a projeção de demanda, previsões de hidrologia e disponibilidade de recursos utilizados por geradores renováveis não convencionais.

Finalmente, a lista de projetos candidatos é composta por 183 linhas de transmissão e 11 transformadores. Tratam-se de circuitos com tensão maior ou igual a 115kV, com custos de investimento variando entre 912 e 103.000 k\$, dependendo do comprimento, capacidade e nível de tensão do circuito. A quantidade de circuitos candidatos em cada país é indicada na

Tabela 1 abaixo:

Tabela 1 - Número de Circuitos Candidatos por País

País	Num. de Linhas Candidatas	Num. de Trafos Candidatos
Guatemala	5	0
Panamá	76	9
Honduras	22	0
Nicarágua	40	0
Costa Rica	29	1
El Salvador	11	1

5.3 Resultados

5.3.1 Análise pré-expansão

Primeiramente, foi realizado uma análise pré-expansão do sistema de transmissão do caso dentro do horizonte de estudo. Essa análise consiste em calcular as médias anuais dos valores de custo marginais de operação e riscos de déficit de cada país e custo operativo total do sistema. Para isso, foi executado o software de despacho econômico hidrotérmico da PSR, o SDDP, considerando a rede de transmissão. Para maiores informações sobre a metodologia utilizada pelo mesmo, o leitor deve consultar [15].

Como a rede está sendo considerada nessa análise, para avaliar o impacto da mesma nos preços e riscos de déficit, os despachos calculados pelo modelo serão diferentes dos despachos utilizados no cálculo do plano de expansão da transmissão, na qual foram calculados sem a rede de transmissão.

A **Tabela 2** abaixo mostra os valores dos custos marginais médios por ano e por país se a rede de transmissão não for expandida a partir de 2019.

Tabela 2 - Custos Marginas de Operação sem Expansão

Ano	Panamá (\$/MWh)	Costa Rica (\$/MWh)	Nicaragua (\$/MWh)	Honduras (\$/MWh)	El Salvador (\$/MWh)	Guatemala (\$/MWh)
2019	82,34	82,28	83,98	82,34	81,73	81,83
2020	92,8	88,77	90,09	89,04	88,77	88,8
2021	102,5	97,81	97,88	96,19	95,56	95,75
2022	141,28	90,43	92,23	92,14	91,72	91,92
2023	175,43	116,15	109,36	95,69	95,38	95,58
2024	244,23	174,86	137,45	65,95	66,78	66,66

A falta de reforços de transmissão no período de estudo limita a capacidade de escoamento da geração nesse mesmo período. Nota-se que no Panamá, na Costa Rica e na Nicarágua, os custos marginais se mostram altos nos últimos anos do horizonte de estudo. Ademais, a ausência da expansão da transmissão aumenta a probabilidade de ocorrência de corte de cargas no sistema. A **Tabela 3** abaixo mostra os riscos de déficit dos países por ano. Pode-se observar que estes foram os únicos países que possuem risco de déficit nos últimos anos, contribuindo para os altos custos marginais observados nos mesmos períodos.

Tabela 3 - Risco de Déficit sem Expansão

Ano	Panamá (%)	Costa Rica (%)	Nicaragua (%)	Honduras (%)	El Salvador (%)	Guatemala (%)
2019	0	0	0	0	0	0
2020	0	0	0	0	0	0
2021	0	0	0	0	0	0
2022	100	0	0	0	0	0
2023	100	0	0	0	0	0
2024	100	100	40	0	0	0

É importante explicitar que nesta análise, apesar de considerar os limites de capacidade da rede de transmissão que não foi expandida, devido ao fato do software SDDP ser uma ferramenta de determinação do despacho de mínimo custo, re-despachos são permitidos, viabilizando despachar térmicas mais caras em outras partes da rede para respeitar os limites operativos, quando possível. Tal fato explica os riscos de déficit iguais a zero para alguns países vistos pelo modelo de despacho mesmo no longo prazo. Porém, é importante enfatizar que quando se está executando a tarefa de expansão da transmissão, além de o re-despacho não ser representado, os cenários de despacho de mínimo custo sem rede são contemplados, isto é, na metodologia hierárquica a rede deve ser expandida com o objetivo de viabilizar o atendimento da demanda ao mínimo custo dado o plano de expansão da geração previamente determinado.

Por último, se olharmos para o custo operativo total do sistema pré-expansão calculado pelo software SDDP, ele é aproximadamente igual a 11.780 M\$. Esse valor representa o custo total operativo em todo horizonte de estudo (2019-2024) trazido a valor presente líquido, com uma taxa de desconto anual igual a 12,64%. Espera-se que esse custo diminua com a inclusão dos reforços de transmissão já que o despacho de térmicas mais caras e cortes de carga devem ser reduzidos. Uma comparação entre os custos operativos sem e com expansão é mostrada a seguir.

5.3.2 Análise da expansão

Para se ter uma ideia da dimensão do problema regional a ser resolvido por ano e por país, o modelo de otimização da expansão do sistema de transmissão, para o Panamá em 2024, o qual é apresentada o maior sistema, apresentou 78 variáveis de decisão de investimento (binárias). A matriz das restrições possuiu 2360 linhas (restrições) e 5173 colunas (variáveis).

Após aplicar a metodologia de expansão proposta, a **Tabela 4** abaixo mostra os tempos computacionais requeridos para a solução do problema de expansão da transmissão, para cada ano e país. As únicas soluções nas quais a fase decomposição atingiu o número máximo de

iterações sem convergir foram as da Costa Rica e do Panamá, ambos casos em 2020, explicando os respectivos altos tempos computacionais em comparação com os outros observados. Nesses casos, as respectivas soluções das fases heurísticas foram recuperadas.

Caso as rodadas fossem realizadas em computação paralela, em que a solução de cada país para o horizonte inteiro seria calculada por CPUs diferentes, o tempo de cálculo do plano de expansão para o todo o sistema seria igual ao maior tempo computacional requerido entre todos os países. Nessa situação, o tempo total seria igual a 32,48 minutos (Costa Rica).

Tabela 4 - Tempo Computacional Requerido para Resolução dos Planos Anuais

País	Plano 2019 (s)	Plano 2020 (s)	Plano 2021 (s)	Plano 2022 (s)	Plano 2023 (s)	Plano 2024 (s)
Costa Rica	99,48	1322,97	96,47	96,61	96,19	236,78
El Salvador	74,46	73,2	72,3	72,5	72,39	137,33
Guatemala	91,99	91,39	91,42	91,06	91,21	91,23
Honduras	178,61	84,9	221,16	84,69	84,65	218,94
Nicaragua	162,73	79,67	80,16	80,51	162,55	80,42
Panama	187,21	666,64	155,95	248,38	94,34	95,79

A **Tabela 5** a seguir mostra o plano de expansão da transmissão calculado, com os custos de investimento, capacidade e ano de entrada em operação de cada reforço de transmissão.

Tabela 5 - Plano de Expansão da Transmissão

Num. Barra DE	Nome Barra DE	Tensão Barra DE (kV)	Num. Barra PARA	Nome Barra PARA	Tensão Barra PARA (kV)	País	Custo (k\$)	Capacidade (MW)	Tipo de Circuito	Ano de Entrada em Operação
6276	CHG230	230	6340	CAN230	230	Panama	3093	304	Linha de transmissão	2019
4315	LBS-138	138	4342	NAG-138	138	Nicaragua	4097	80	Linha de transmissão	2019
3211	NAC 230	230	3301	AGC B624	230	Honduras	5493	317	Linha de transmissão	2019
54000	PAR230	230	56102	PAL230B	230	Costa Rica	15737	374	Linha de transmissão	2020
6014	PRO230	230	6380	BOQIII230	230	Panama	5205	556	Linha de transmissão	2020
6000	FRONTPRO	230	6014	PRO230	230	Panama	2832	193	Linha de transmissão	2020
58300	MOI230A	230	58350	CAH230	230	Costa Rica	7408	259	Linha de transmissão	2020
56050	RCL230A	230	56100	PAL230A	230	Costa Rica	8272	300	Linha de transmissão	2020
6260	CHA230	230	6400	FRONTCHA	230	Panama	3559	304	Linha de transmissão	2020
50950	CAR230A	230	54500	GEN230	230	Costa Rica	12297	659	Linha de transmissão	2020
54000	PAR230	230	56102	PAL230B	230	Costa Rica	19868	374	Linha de transmissão	2020
6000	FRONTPRO	230	6014	PRO230	230	Panama	2832	193	Linha de transmissão	2020
6000	FRONTPRO	230	6014	PRO230	230	Panama	2832	193	Linha de transmissão	2020
56050	RCL230A	230	56100	PAL230A	230	Costa Rica	8272	300	Linha de transmissão	2020
3029	CRL B501	138	3098	RLN B521	138	Honduras	4500	152	Linha de transmissão	2021
3098	RLN B521	138	3180	CAR B540	138	Honduras	4500	152	Linha de transmissão	2021
3123	VNU B520	138	3180	CAR B540	138	Honduras	4500	152	Linha de transmissão	2021
6040	SFR115	115	6230	CBA115	115	Panama	1202	230	Linha de transmissão	2022
4315	LBS-138	138	4342	NAG-138	138	Nicaragua	4097	80	Linha de transmissão	2023
27161	AHUA-115	115	27411	SONS-115	115	El Salvador	3696	130	Linha de transmissão	2024
3097	RGU B518	138	3105	SIS B548	138	Honduras	7607	152	Linha de transmissão	2024
50504	GUA138	138	50604	FIL138	138	Costa Rica	4070	265	Linha de transmissão	2024
3055	CTE B513	138	3105	SIS B548	138	Honduras	1474	152	Linha de transmissão	2024

Embora a solução do Panamá em 2021 não tenha reforços de transmissão, ela se mostrou deficitária por permitir cenários com corte de carga. O maior valor de corte entre todos os cenários nesse ano foi de 4,74 MW, que corresponde a 0,24% da demanda do cenário em questão. Isso ocorreu devido à falta de opções de circuitos candidatos que eliminassem esse específico déficit. Por outro lado, a partir de 2022, as soluções não apresentaram mais cortes de carga no país.

A rede atual da Guatemala se mostrou robusta o suficiente para suportar os cenários de despacho de todo o período de estudo. Por isso, o plano de expansão calculado não contém reforços de transmissão na Guatemala.

Nos demais países, houve investimento em reforços de transmissão e não foram observados cenários com cortes de carga pós-expansão.

Para a validação do plano da expansão da transmissão calculado, as mesmas análises feitas na subseção anterior foram realizadas para o caso com a rede expandida. A **Tabela 6** a seguir exibe os valores de custos marginais de operação pós expansão e a **Tabela 7**, os riscos de déficit em todo horizonte de estudo.

Tabela 6 - Custos Marginais de Operação com Expansão

Ano	Panamá (\$/MWh)	Costa Rica (\$/MWh)	Nicaragua (\$/MWh)	Honduras (\$/MWh)	El Salvador (\$/MWh)	Guatemala (\$/MWh)
2019	84,15	84,03	84,15	82,65	82,09	82,17
2020	89,71	89,65	90,96	89,47	88,6	88,75
2021	95,46	95,34	95,78	94,82	94,7	94,71
2022	94,03	94,66	95,53	94,89	92,59	92,83
2023	102,79	102,86	103,33	103,21	103,15	103,16
2024	100,58	100,6	99,37	98,1	98,03	98,05

Tabela 7 - Risco de Déficit com Expansão

Ano	Panamá (%)	Costa Rica (%)	Nicaragua (%)	Honduras (%)	El Salvador (%)	Guatemala (%)
2019	0	4	0	0	0	0
2020	0	0	0	0	0	0
2021	0	0	0	0	0	0
2022	4	4	4	4	0	0
2023	0	0	0	0	0	0
2024	0	0	0	0	0	0

Comparando a **Tabela 2** com a **Tabela 6**, nota-se que os custos marginais em boa parte dos países reduziram significativamente em todo o horizonte de estudo, assim como os riscos

de déficit, comparando as Tabelas 3 e 7, mostrando-se nulos em praticamente todo horizonte de estudo, exceto em 2019 e 2021, onde os riscos foram bem baixos (apenas 4%). Isso contribuiu também para a queda média dos custos marginais. Isso se deve ao fato do sistema apresentar uma maior flexibilidade no despacho, já que os gargalos de transmissão existentes no caso pré-expansão foram resolvidos com a adição dos reforços, permitindo uma capacidade maior de escoamento da energia gerada pelos parques geradores.

Apesar da existência de valores de risco de déficit maiores que zero, o plano de expansão da transmissão conseguiu reduzir notoriamente os riscos, pois antes havia valores iguais a 100%.

Para explicar os riscos de déficit maiores que zero observados, é plausível ressaltar que o plano de expansão da transmissão é calculado com o objetivo de comportar os diferentes cenários de despacho de mínimo custo para o sistema. Para que estes despachos de mínimo custo sejam encontrados, não se considera a rede de transmissão completa na expansão da geração e os despachos resultantes desta etapa que são utilizados para a expansão da transmissão. Porém, ao realizar o despacho do sistema pós-expansão contemplando a rede, como agora o problema de despacho é bem mais restritivo, re-despachos são necessários para respeitar os limites operativos da rede. Neste caso, como se pode ver, a operação se torna mais complexa e déficits não vistos na etapa de transmissão agora podem ocorrer.

Além da diminuição do risco de déficit para valores aceitáveis, o custo marginal médio do sistema centro-americano como um todo apresentou uma queda de aproximadamente 6%. Em contrapartida, houve um aumento de custo marginal em alguns países, como por exemplo Guatemala em 2024. Como o despacho hidrotérmico e a operação dos países é feito de maneira integrada, caso o recurso marginal da Guatemala apresente menor custo operativo que o recurso marginal de outro país, ela exportará energia. Analogamente, países que apresentavam risco de déficit igual a zero pré-expansão podem apresentar riscos maiores que zero pós-expansão. Tais fatos ocorrem porque a operação integrada e sinérgica entre os países faz com que um país envie energia a outro, podendo resultar em custos marginais maiores em países exportadores e riscos de déficit maiores que zero em países que não apresentavam nenhum risco pré-expansão (por evitar déficits muito mais significativos em outros).

Finalmente, o custo operativo total do sistema foi aproximadamente igual a 9.770 M\$. Comparando-o com o custo operativo pré-expansão, observa-se uma queda de aproximadamente 17%, confirmando a melhora operativa causada pela inclusão dos reforços

de transmissão, evitando re-despachos no sistema, isto é, que térmicas mais caras sejam despachadas para respeitar limites operativos do sistema de transmissão.

Ademais, a **Tabela 7** explicitada acima ressalta a importância da validação do plano de expansão da transmissão obtido com a ferramenta de despacho de longo prazo, pois na metodologia proposta, o plano de expansão da geração, bem como os cenários de despacho são dados de entrada para a tarefa de planejamento da expansão da transmissão e como os cenários de despacho vieram de uma execução da ferramenta de despacho sem rede, não representam os gargalos operativos que a rede de transmissão causa. Portanto, é necessário verificar se com a representação completa da rede no despacho hidrotérmico, a demanda é atendida respeitando os critérios de suprimento do sistema.

Em resumo, além de melhorar a operação do sistema elétrico centro americano, o plano de expansão calculado através da metodologia proposta garante o atendimento a carga do sistema no longo prazo. Vale ressaltar que os planos de expansão foram calculados sem uma exigência computacional grande, já que os tempos de execução foram representativamente pequenos para a etapa de planejamento da expansão de longo prazo, o que dá mais credibilidade à metodologia de expansão abordada.

6 Conclusão

O planejamento da expansão da transmissão é extremamente importante na busca do equilíbrio entre oferta e demanda de energia. Por isso, existem diversas maneiras de planejar o sistema de transmissão a longo prazo. Na parte inicial do trabalho, foram citadas algumas das classificações do planejamento da expansão da transmissão muito utilizadas na literatura em relação ao tratamento do horizonte de estudo, tratamento de incertezas, métodos de resolução, entre outros. Na sequência, a formulação matemática básica do problema de expansão da transmissão foi demonstrada, através de diferentes níveis de representação das leis de Kirchhoff.

A partir dessas informações, a metodologia proposta de cálculo do plano de expansão ótimo foi apresentada. Primeiro ela calcula o plano de expansão através de heurísticas, exigindo um esforço computacional baixo na resolução do problema de expansão. Em seguida, aproveitando-se de cortes gerados na primeira fase, uma outra forma de resolução é realizada, baseada em decomposição de Benders, com o objetivo de buscar o plano ótimo de expansão.

Além de garantir otimalidade caso a segunda fase atinja o gap de convergência, esse método de resolução da expansão possui outras vantagens como por exemplo a recuperação da solução calculada na primeira fase caso a segunda ultrapasse um número limite de iterações pré-definido. Dessa maneira, o algoritmo sempre apresenta a melhor solução viável encontrada até o final de sua execução. Uma outra vantagem é em relação aos tempos de execução do algoritmo, que são relativamente baixos. Caso o sistema a ser expandido for regional, a solução por região e a utilização de computação paralela também contribuem para que os tempos computacionais sejam pequenos, além de ser a abordagem plausível de ser aplicada em sistemas formados principalmente por diversos países, devido a questões regulatórias e políticas de cada país

Todos esses pontos positivos citados acima foram validados após a aplicação da metodologia de expansão em um caso representativo do sistema elétrico centro americano. Pelos resultados obtidos, pode-se afirmar que o plano de expansão calculado impactou positivamente na operação do sistema como um todo, reduzindo os custos operativos para atendimento da demanda, os valores dos custos marginais operativos e riscos de corte de carga significativamente.

Portanto, a metodologia de planejamento da expansão de sistemas de transmissão apresentada se mostrou bastante efetiva e altamente aplicável em sistemas elétricos reais de grande porte, como é o caso do sistema elétrico brasileiro.

7 Trabalhos Futuros

Recomenda-se como primeiro trabalho futuro aplicar a mesma metodologia de planejamento da expansão da transmissão considerando critérios de segurança. O critério a ser abordado a priori é o critério N-1, na qual a rede expandida deve atender plenamente a demanda do sistema sem sobrecarregá-lo, mesmo com a ocorrência de uma contingência simples em qualquer circuito do sistema ou de uma lista de circuitos pré-definida (lista de contingências).

Levando em consideração esse critério na resolução do problema, espera-se que o modelo invista em mais reforços de transmissão. Uma comparação entre os resultados mostrados neste trabalho com os resultados gerados implementando o critério N-1 pode ser feita a fim de capturar no detalhe os efeitos da implementação de critérios de segurança no problema de expansão.

Uma outra abordagem a ser realizada é aplicar a mesma metodologia de expansão no sistema brasileiro. O sistema elétrico brasileiro é um sistema extremamente grande e composto por quatro subsistemas, tornando-o um excelente “estudo de caso” para essa metodologia de expansão. Como nesse caso os subsistemas compõem um único país, rodadas integradas podem ser realizadas e comparadas com as rodadas regionais. Além disso, os resultados gerados podem ser comparados com relatórios de expansão oficiais emitidos pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE) para uma melhor avaliação dos planos de expansão calculados. Neste caso, o critério N-1 também deveria ser respeitado por ser utilizado no sistema elétrico brasileiro.

Por fim, uma análise do efeito da variação de parâmetros de execução do modelo, como o número máximo de cenários críticos a serem selecionados ou a utilização de outros critérios de seleção de cenários críticos, na convergência e resultados dos problemas de expansão pode ser feita. O objetivo dessa análise é procurar parâmetros que ajudam na convergência dos problemas e encontrar um bom equilíbrio entre número de cenários críticos contemplados, tempos computacionais e qualidade das soluções encontradas.

8 Bibliografia

[1] R. C. PEREZ, G. C. OLIVEIRA, M. V. PEREIRA, *et al.*, “FACTS and D-FACTS: The Operational Flexibility Demanded by the Transmission Expansion Planning Task with Increasing RES”, Cigré Session 45, Paris, 2016.

[2] R. C. PEREZ, *Power Flow Controllability and Flexibility in the Transmission Expansion Planning Problem: a Mixed-Integer Linear Programming approach*, Tese de Mestrado, COPPE, UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, Março 2014.

[3] S. LUMBRERAS, A. RAMOS, “The new challenges to transmission expansion planning. Survey of recent practice and literature review”, *Electric Power Systems Research*, vol. 134, pp. 19-29, 2016.

[4] 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, Brazil, Abril 2000.

[5] S. GRANVILLE, M. V. F. PEREIRA, G. B. DANTZIG, *et al.*, “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.

[6] S. BINATO, M. PEREIRA S. GRANVILLE, “A New Benders Decomposition Approach to Solve Power Transmission Network Design Problems”, *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol 16, No. 2, 2001.

[7] G. LATORRE, R.D. CRUZ, J.M. AREIZA, *et al.*, “Classification of Publications and Models on Transmission Expansion Planning”, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 18, no. 2, pp. 938-945, Maio 2003.

[8] G. C. OLIVEIRA, S. BINATO, M. V. PEREIRA, *et al.*, “Multi-Stage Transmission Expansion Planning Considering Multiple Dispatches and Contingency Criterion”. Disponível em: <www.psr-inc.com/psr/download/papers/cba04EXPTRCTG.pdf>. Acesso em: 15 de Janeiro de 2016.

[9] S. BINATO, G. C. OLIVEIRA, “A heuristic procedure to cope with multi-year transmission expansion planning,” in *Proc. IEEE/KTH Stockholm Power Tech. Conf., Stockholm, Sweden, Jun. 1995*.

[10] R. ROMERO, A. MONTICELLI, A. GARCIA, *et al.*, “Test systems and mathematical models for transmission network expansion planning”, *IEE Proceedings – Generation, Transmission and Distribution*, vol. 149, Jan 2002.

[11] C. BORGES, “Análise de Sistemas de Potência”, EE-UFRJ, Março 2005.

[12] N. MACULAN, M. FAMPA, “Otimização Linear”, UFRJ, Dezembro 2004.

[13] *Informes Finales de Coformación del MER*. Disponível em: <www.enteoperador.org>. Acesso em: 27 de Setembro de 2016.

[14] PSR, “OPTNET – Network Transmission Expansion Planning and Analysis – Methodology Manual”, Version 2.7, Rio de Janeiro, RJ, Brazil, November 2012.

[15] PSR, “SDDP – Methodology Manual”, Version 14.0, Rio de Janeiro, RJ, Brazil, January 2016.

[16] G. COUTO, F. THOMÉ, R. C. PEREZ, *et al.*, “Modelo de Planejamento de Redes de Transmissão Aplicado à Expansão do Sistema do WECC nos Estados Unidos”, in *XII Symposium of specialists in electric operational and expansion planning*, Rio de Janeiro, Brasil, Maio de 2012.