

UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA
FACULDADE DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
ELÉTRICA

Ezequiel da Silva Oliveira

Heurística construtiva em dois níveis visando a determinação das
decisões de investimento no planejamento da expansão de sistemas de
transmissão

Juiz de Fora

2020

Ezequiel da Silva Oliveira

**Heurística construtiva em dois níveis visando a determinação das
decisões de investimento no planejamento da expansão de sistemas de
transmissão**

Tese apresentada ao Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Elé-
trica da Universidade Federal de Juiz de
Fora como requisito parcial à obtenção do
título de Doutor em Engenharia Elétrica.
Área de concentração: Sistemas de Ener-
gia Elétrica

Orientador: Prof. Dr. Ivo Chaves da Silva Junior

Coorientador: Prof. Dr. Leonardo Willer de Oliveira

Juiz de Fora

2020

Ficha catalográfica elaborada através do Modelo Latex do CDC da UFJF
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Oliveira, Ezequiel da Silva.

Heurística construtiva em dois níveis visando a determinação das decisões de investimento no planejamento da expansão de sistemas de transmissão / Ezequiel da Silva Oliveira. – 2020.

93 f. : il.

Orientador: Ivo Chaves da Silva Junior

Coorientador: Leonardo Willer de Oliveira

Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Juiz de Fora, Faculdade de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, 2020.

1. Planejamento da expansão do sistema de transmissão. 2. Heurística construtiva. 3. Função hiperbólica. I. Silva Junior, Ivo Chaves da, orient. II. Oliveira, Leonardo Willer de, coorient. III. Título.

Ezequiel da Silva Oliveira

**Heurística construtiva em dois níveis visando a determinação das
decisões de investimento no planejamento da expansão de sistemas de
transmissão**

Tese apresentada ao Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Elé-
trica da Universidade Federal de Juiz de
Fora como requisito parcial à obtenção do
título de Doutor em Engenharia Elétrica.
Área de concentração: Sistemas de Ener-
gia Elétrica

BANCA EXAMINADORA

Aprovada em 18 de dezembro de 2020



Prof. Dr. Ivo Chaves da Silva Júnior - Orientador
Universidade Federal de Juiz de Fora, UFJF



Prof. Dr. Leonardo Willer de Oliveira - Coorientador
Universidade Federal de Juiz de Fora, UFJF



Prof.^a Dra. Ahda Pionkoski Grilo Pavani
Universidade Federal do ABC, UFABC



Prof. Dr. Wesley Peres
Universidade Federal de São João del-Rei, UFSJ



Prof. Dr. Bruno Henriques Dias
Universidade Federal de Juiz de Fora, UFJF



Prof. Dr. João Alberto Passos Filho
Universidade Federal de Juiz de Fora, UFJF

Dedico este trabalho aos meus pais, Procidônia
e Joaquim, e a toda a minha família.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, pelo dom da minha vida.

Agradeço ao meu orientador Ivo Chaves da Silva Junior, por todos os ensinamentos ao longo destes anos, pela amizade, dedicação, pelo incentivo e pela compreensão durante todas as fases que passei.

Agradeço ao meu coorientador Leonardo Willer de Oliveira, pela amizade e dedicação durante a realização deste trabalho.

Agradeço à minha família, pelo amor e incentivo a todo o momento, por me apoiar em todas as minhas decisões. Em especial, a Débora, por estar ao meu lado.

Agradeço aos amigos do NUPESP, por compartilharem momentos de descontração, tornando os dias mais tranquilos.

Agradeço ao CEFET/RJ campus Angra do Reis, na figura de pessoas, aos professores do colegiado do curso de Engenharia Elétrica, aos alunos e aos amigos, que me incentivaram na finalização desta etapa.

Agradeço também à Prof.^a Ahda, ao Prof. Wesley, ao Prof. Bruno e ao Prof. João por aceitarem fazer parte da defesa do meu doutorado e que, com absoluta certeza, foi muito mais produtivo diante de seus apontamentos e orientações que contribuíram com a minha formação, refletindo na melhora deste documento.

Agradeço à UFJF e ao PPEE, por propiciar a minha formação e capacitação profissional. Este agradecimento remete aos professores e técnicos administrativos com quem eu tive o prazer de conviver, desde a minha graduação até os cursos de pós-graduação.

“Se a educação sozinha não transforma a sociedade, sem ela tampouco a sociedade muda.”
(Paulo Freire).

RESUMO

O planejamento da expansão de sistemas de transmissão de energia elétrica consiste na determinação de reforços a serem construídos, dentro de um conjunto pré-definido de reforços candidatos à expansão, a fim de suprir a demanda de um sistema de potência, de forma a minimizar os custos de investimento e de operação em um horizonte de planejamento. Este problema de otimização é de difícil resolução por apresentar algumas particularidades: *(i)* várias soluções possíveis, o que leva grande parte dos algoritmos a convergirem para soluções ótimas locais; *(ii)* natureza inteira-mista e combinatória das opções de investimento; *(iii)* grande porte dos sistemas de transmissão, referindo-se à sistemas reais; e *(iv)* existência de sistemas elétricos não conexos. Estas particularidades referem-se às principais dificuldades no desenvolvimento de algoritmos eficientes. A elaboração de algoritmos/técnicas capazes de conciliar a obtenção de soluções de qualidade, independente do tamanho do sistema, e baixo esforço computacional é um campo atrativo de pesquisa e desenvolvimento. Sendo assim, na presente pesquisa é proposto um novo algoritmo heurístico construtivo. Essa nova técnica, além de manter todas as vantagens inerentes a essa classe de algoritmos, difere das heurísticas construtivas existentes na literatura por: *(i)* Apresentar dois estágios de busca, sendo estes proporcionados pela representação adotada (função tangente hiperbólica e variações de sua inclinação) para as variáveis de decisão. A estratégia de busca em dois estágios possibilita uma melhor exploração da região de solução e, conseqüentemente, uma maior assertividade na solução final obtida; *(ii)* Utilizar um indicador de desempenho inédito para especificar as expansões a serem realizadas no sistema de transmissão de energia elétrica. Analisando os resultados encontrados percebe-se que a estratégia heurística proposta traz uma interessante contribuição para área, uma vez que a mesma conseguiu, para os sistemas analisados, atender dois requisitos importantes e perseguidos por grande parte das metodologias empregadas na resolução do problema aqui abordado que são o baixo esforço computacional e a qualidade das soluções finais obtidas.

Palavras-chave: Planejamento da expansão de sistemas de transmissão. Heurística construtiva. Função hiperbólica.

ABSTRACT

The transmission network expansion planning of electric energy consists of determining the reinforcements to be built, within a pre-defined set of reinforcements that are candidates for expansion, for supply the demand for a power system, in order to minimize investment and operating costs in a planning horizon. This optimization problem is difficult to solve because it presents some particularities: (i) several possible solutions, which leads most of the algorithms to converge to local optimal solutions; (ii) mixed-integer and combinatorial nature of investment options; (iii) large size of transmission systems, referring to real systems; and (iv) existence of non-connected electrical systems. These particularities refer to the main difficulties in the development of efficient algorithms. The development of algorithms/techniques capable of reconciling the achievement of quality solutions, regardless of the size of the system, and low computational effort is an attractive field of research and development. Therefore, in this research, a new constructive heuristic algorithm is proposed. This new technique, besides maintaining all the advantages inherent to this class of algorithms, differs from the constructive heuristics in the literature by: (i) presenting two-stage of search, these being provided by the adopted representation (hyperbolic tangent function and variations of slope) for decision variables. The two-stage search strategy allows for a better exploration of the solution region and, consequently, greater assertiveness in the last gotten solution; (ii) Use an unprecedented performance indicator to specify the expansions to be carried out in the electricity transmission system. Analyzing the results found, the proposed heuristic strategy brings an interesting contribution to the area, since it has managed, for the analyzed systems, to meet two important requirements and pursued by most of the methodologies used in solving the problem addressed here that are the low computational effort and the quality of the final gotten solutions.

Keywords: Transmission network expansion planning. Constructive heuristic. Hyperbolic function.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Modelos abordados nos recentes problemas do Planejamento da Expansão de Sistemas de Transmissão (PET).	19
Figura 2 – Modelos de fluxo de potência usados nos problemas do PET.	19
Figura 3 – Métodos e técnicas aplicadas aos problemas do PET.	20
Figura 4 – Decisão binária - função Degrau.	38
Figura 5 – Função de decisão de reforço (<i>DR</i>) - exemplo ilustrativo.	40
Figura 6 – Heurística construtiva.	46
Figura 7 – Fluxograma da Heurística Construtiva em Dois Níveis.	49
Figura 8 – Possíveis valores para o coeficiente de inclinação (A^1) - Estágio 1.	52
Figura 9 – Identificação do coeficiente de inclinação (A^{1*}) que possibilitou a melhor solução no Estágio 1.	53
Figura 10 – Possíveis valores para o coeficiente de inclinação (A^2) - Estágio 2.	53
Figura 11 – Sistema IEEE 24 barras.	54
Figura 12 – Custo de investimento relacionado às inclinações (A^1) - Estágio 1.	55
Figura 13 – Número de execuções de Programação Não Linear (PNL) relacionado às inclinações (A^1) - Estágio 1.	56
Figura 14 – Custo de investimento relacionado às inclinações (A^2) - Estágio 2.	58
Figura 15 – Número de execuções de PNL relacionado às inclinações (A^2) - Estágio 2.	59
Figura 16 – Dispersão do custo de investimento em cada estágio da Heurística Construtiva em Dois Níveis (HCDN).	60
Figura 17 – Sistema equivalente do Sul Brasileiro.	70
Figura 18 – Sistema Colombiano.	74

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Vantagens e desvantagens dos métodos de resolução.	21
Tabela 2 – Planejamento da expansão do sistema de transmissão IEEE24G4 sem redespacho obtido pela HCDN - Estágio 1.	57
Tabela 3 – Planejamento da expansão do sistema de transmissão IEEE 24 barras cenário G4 sem redespacho obtido pela HCDN.	59
Tabela 4 – Comparação do desempenho da HCDN com resultado da literatura especializada - IEEE24G4 sem redespacho.	61
Tabela 5 – Custo de investimento obtido pela HCDN e seus parâmetros otimizados para o sistema de transmissão IEEE 24 barras sem redespacho.	66
Tabela 6 – Comparação dos resultados obtidos pela HCDN para o sistema IEEE 24 barras.	67
Tabela 7 – Planejamento da expansão do sistema de transmissão IEEE 24 barras sem redespacho obtido pela HCDN.	68
Tabela 8 – Custo de investimento obtido pela HCDN e seus parâmetros otimizados para o sistema de transmissão Sul Brasileiro.	71
Tabela 9 – Comparação do custo de investimento obtido da HCDN para o Sistema Sul Brasileiro.	72
Tabela 10 – Comparação relacionada ao número de execuções de PNLs para o Sistema Sul Brasileiro.	72
Tabela 11 – Planejamento da expansão do sistema de transmissão Sul Brasileiro obtido pela HCDN.	73
Tabela 12 – Custo de investimento obtido pela HCDN e seus parâmetros otimizados para o sistema de transmissão Colombiano.	75
Tabela 13 – Comparação do custo de investimento obtido da HCDN para o Sistema Colombiano.	76
Tabela 14 – Comparação relacionada ao número de execuções de PNLs para o Sistema Colombiano.	76
Tabela 15 – Planejamento da expansão do sistema de transmissão Colombiano sem redespacho obtido pela HCDN.	77

Tabela 16 – Custo de investimento obtido pela HCDN e seus parâmetros otimizados para os sistemas que considera perdas ativas.	79
Tabela 17 – Comparação do custo de investimento obtido da HCDN para os sistemas considerando perdas ativas.	79
Tabela 18 – Planejamento da expansão obtido pela HCDN para os sistemas de transmissão Garver e Sul Brasileiro com redespacho, considerando perdas ativas.	80
Tabela 19 – Custo de investimento obtido por técnicas heurísticas construtivas.	81
Tabela 20 – Obtenção do menor custo de investimento para os sistemas de transmissão.	82

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACO Otimização por Colônia de Formigas (*Ant Colony Optimization*, em inglês)

ARO Otimização Robusta Ajustável (*Adaptive Robust Optimization*, em inglês)

AHC Algoritmo Heurístico Construtivo

CA Corrente Alternada

CC Corrente Contínua

DR Decisão de Reforço

FTH Função Tangente Hiperbólica

FOB Função Objetivo

FPO Fluxo de Potência Ótimo

HC Heurística Construtiva

HCDN Heurística Construtiva em Dois Níveis

IFSA Algoritmo de seleção direta melhorado (*Improved Forward Selection Algorithm*, em inglês)

MPI Método de Pontos Interiores

PET Planejamento da Expansão de Sistemas de Transmissão

PLIM Programação Linear Inteira Mista

PNLIM Programação Não Linear Inteira Mista

PNL Programação Não Linear

PSO Otimização via Enxame de Partículas (*Particle Swarm Optimization*, em inglês)

SCFL Limitadores de Corrente de Curto-Circuito Supercondutores (*Superconducting Fault Current Limiters*, em inglês)

SEP Sistema Elétrico de Potência

TCSC Compensador Série Controlado a Tiristores (*Thyristor-Controlled Series Compensators*, em inglês)

LISTA DE SÍMBOLOS

Variáveis de decisão relacionadas ao problema PET

G_i	Potência gerada pela unidade geradora conectada à barra i [MW]
r_m	Potência gerada pela unidade geradora fictícia conectada à barra m [MW]

Variáveis auxiliares e constantes relacionadas ao problema PET

nr	Número total de barras com geradores fictícios que representa o déficit de potência no sistema
nc	Número total de reforços candidatos
Ω_i	Conjunto de reforços/circuitos conectados à barra i
Ω_B	Conjunto de barras do sistema de transmissão
Ω_E	Conjunto de circuitos de transmissão existentes
Ω_C	Conjunto de reforços candidatos à expansão
c_m	Custo do déficit de potência da unidade geradora fictícia m [\$/MW]
k_l	Custo da construção do reforço candidato l [\$]
D_i	Demanda de potência na barra i [MW]
θ_l	Diferença angular entre as barras terminais do circuito/reforço l [rad]
b_l	Susceptância do circuito/reforço l [S]
g_l	Condutância do circuito/reforço l [S]
G_i^{\max}	Limite máximo de geração da unidade geradora conectada à barra i [MW]
r_m^{\max}	Limite máximo de geração da unidade geradora fictícia conectada à barra m [MW]
F_l	Fluxo de potência ativa no circuito/reforço l [MW]
F_l^{\min}, F_l^{\max}	Limites de fluxo de potência ativa no circuito/reforço l [MW]
DR_l	Função de decisão de reforço l a ser construído, representando a variável de decisão binária [0, 1]

Variável de decisão relacionada à heurística proposta

x_l Variável independente do função tangente hiperbólica relacionado ao reforço l

Variáveis auxiliares e constantes relacionadas à heurística proposta

x^{\min}, x^{\max} Limites da variável de decisão da função tangente hiperbólica

DR_l^1 Valor contínuo da função tangente hiperbólica na fase de construção associado ao reforço l

A^1 Coeficiente de ajuste da inclinação da função tangente hiperbólica no Estágio 1

S^1 Passo para o ajuste do coeficiente da inclinação da função tangente hiperbólica no Estágio 1

A^{\min}, A^{\max} Limites do coeficiente de ajuste da inclinação da função tangente hiperbólica no Estágio 1

A^{1*} Coeficiente da inclinação ótima do Estágio 1

DR_l^2 Valor contínuo da função tangente hiperbólica na fase do refinamento (Estágio 2) associado ao reforço l

A^2 Coeficiente de ajuste da inclinação da função tangente hiperbólica no Estágio 2

S^2 Passo para o ajuste do coeficiente de inclinação da função tangente hiperbólica no Estágio 2

Δ Variação em torno do A^{1*} para a inclinação da função tangente hiperbólica no Estágio 2

A^{2*} Coeficiente da inclinação ótima do Estágio 2

ID_l Indicador de desempenho associado a cada reforço l [MW/\$]

DE_l Decisão de expansão do reforço l

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	17
1.2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	22
1.2.1	Trabalhos relacionados: Heurísticas construtivas	26
1.3	MOTIVAÇÃO DA PESQUISA	29
1.4	OBJETIVOS DA PESQUISA	30
1.5	PUBLICAÇÃO DA PESQUISA	31
1.6	ORGANIZAÇÃO DA TESE	31
2	FORMULAÇÃO DO PROBLEMA	33
2.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	33
2.2	MODELAGEM DO PROBLEMA DO PLANEJAMENTO DA EXPANSÃO DE SISTEMAS DE TRANSMISSÃO	33
2.2.1	Função objetivo (FOB)	36
2.2.2	Restrição de balanço de potência ativa	36
2.2.2.1	<i>Fluxo de potência</i>	36
2.2.3	Restrições de canalização	37
2.2.4	Função de Decisão de Reforço	37
2.3	CONCLUSÕES PARCIAIS	40
3	HEURÍSTICA CONSTRUTIVA PROPOSTA	42
3.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	42
3.2	A HEURÍSTICA CONSTRUTIVA EM DOIS NÍVEIS	43
3.2.1	Estágio 1: Construção	43
3.2.2	Estágio 2: Refinamento	46
3.2.3	Fluxograma geral da heurística construtiva proposta	48
3.2.4	Calibração da Heurística Construtiva em Dois Níveis	51
3.3	SISTEMA TESTE: IEEE24G4	53
3.3.1	Fase de construção (Estágio 1): IEEE24G4	55
3.3.2	Fase de refinamento (Estágio 2): IEEE24G4	57
3.3.3	Análise da HCDN: IEEE24G4	59
3.4	CONSIDERAÇÕES PARCIAIS	61

4	VALIDAÇÃO DA TÉCNICA PROPOSTA: ESTUDO DE CASOS	63
4.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	63
4.2	DESPREZANDO O EFEITO DAS PERDAS ATIVAS DA TRANSMISSÃO	65
4.2.1	Sistema IEEE 24 barras	65
4.2.2	Sistema Sul Brasileiro	69
4.2.3	Sistema Colombiano	73
4.3	CONSIDERANDO O EFEITO DAS PERDAS ATIVAS DA TRANSMISSÃO	77
4.4	COMPARAÇÕES COM RESULTADOS ENCONTRADOS POR HEURÍSTICAS CONSTRUTIVAS	81
4.5	ANÁLISE DE DESEMPENHO DA HCDN	82
4.6	CONCLUSÕES PARCIAIS	83
5	CONCLUSÃO	85
5.1	CONSIDERAÇÕES FINAIS	85
5.2	TRABALHOS FUTUROS	86
	REFERÊNCIAS	88

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A finalidade de um Sistema Elétrico de Potência (SEP) é garantir o atendimento de energia elétrica de forma ininterrupta, sendo necessário acompanhar o perfil de crescimento da demanda. Portanto, para que o fornecimento de energia elétrica seja ininterrupto, é necessário que o SEP seja confiável. Essa característica implica a segurança de sua operação, que requer recursos suficientes para prover o atendimento. Dessa forma, é necessário realizar o planejamento da disponibilidade dos recursos, identificando, de forma mais econômica, quando (na abordagem dinâmica) e onde (na abordagem estática) deve ser realizado o investimento para viabilizar a expansão do sistema. As questões estratégicas relacionadas à decisão de investimento do setor de energia elétrica e ao transporte de grandes blocos desta energia por longas distâncias contribuem para que o problema do planejamento do SEP, de modo geral, seja tarefa importante e de difícil resolução (LATORRE et al., 2003).

Com o objetivo de aumentar a eficiência dos agentes de geração, transmissão e distribuição, os SEPs convergem para uma estrutura descentralizada nas tomadas de decisão. Sendo assim, estratégias de planejamento devem ser desenvolvidas para garantir que as decisões sejam ótimas ou estejam economicamente próximas destas decisões. O processo de decisão referente à seleção dos reforços para o sistema de transmissão de energia elétrica abrange um problema de otimização complexo e de grande porte, conhecido como planejamento da expansão de sistemas de transmissão de energia elétrica (PET).

O planejamento da expansão de sistemas de transmissão de energia elétrica é, normalmente, determinado com base em um conjunto de reforços previamente definidos, sendo esses selecionados de modo a garantir o atendimento à demanda ao menor custo possível. Dada essa característica de resolução, a abordagem estática do problema do PET consiste na tomada de decisões para um único intervalo de tempo e desconsidera a localização de investimentos futuros ao longo do horizonte de planejamento. Para resolver o problema, são exigidas das técnicas de otimização habilidades para lidar com suas especificidades, a fim de obter solução de boa

qualidade com bom desempenho computacional. Para tanto, a técnica utilizada deve ser capaz de contornar as seguintes especificidades:

- i.** a estrutura multimodal do problema, resultando em múltiplas soluções possíveis que, eventualmente, levam à convergência da técnica para ótimos locais;
- ii.** a natureza não linear inteira mista e combinatória do problema quanto às possibilidades de investimento;
- iii.** o tamanho do problema, considerando sistemas reais;
- iv.** a existência de elementos ou seções não conectados à rede principal (não conexos).

Diante das características apresentadas anteriormente, ao definir o horizonte de planejamento, que pode ser classificado como curto, médio e longo prazo, tal divisão acarreta na adequação de ferramentas e de critérios empregados em cada etapa. No planejamento de curto e médio prazo, objetiva-se realizar os ajustes técnicos não considerados no longo prazo por meio de análise criteriosa, havendo necessidade da análise precisa do fluxo de potência que ocorre mediante a adoção do modelo não linear (modelo CA). O planejamento de longo prazo caracteriza-se por uma análise que possibilita aproximações e os reforços a serem definidos envolvem linhas de transmissão e/ou transformadores (com característica de linha transmissão) (FLÁVIO, 2015).

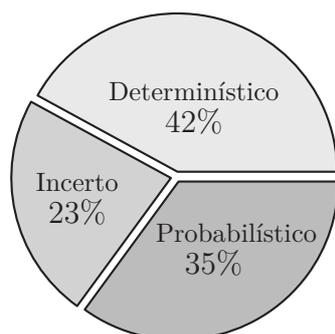
A fim de avaliar a qualidade do plano de expansão mediante o atendimento da demanda e as incertezas relacionadas à operação do SEP, existem as seguintes abordagens: *(i)* determinística, cuja inserção de reforços está relacionada à análise de contingência (por exemplo, N-1); *(ii)* não determinística, que está relacionada às incertezas internas representadas pelas indefinições referentes à disponibilidade de equipamentos, sendo, geralmente, representada por modelos estocásticos e avaliadas através de índices de sensibilidade, e às incertezas externas, que se relacionam com a geração, projeção de mercados e restrições ambientais, por exemplo.

O suprimento ininterrupto de energia elétrica deve ser assegurado pelo plano de expansão. Para obtenção desse plano, devem ser realizadas análises que envolvam cenários considerados severos ou não. Basicamente, tais análises consistem na tentativa de avaliar os riscos relacionados à operação do SEP para situações

adversas como, por exemplo, indisponibilidade de recursos energéticos primários, falhas inesperadas em equipamentos e crescimento da demanda além do previsto (FLÁVIO, 2015). A análise de risco é realizada por intermédio de: (i) métodos determinísticos, que consistem na obtenção de um plano de expansão que garanta o funcionamento do SEP, porém, sem estabelecer o grau de seu desempenho; (ii) métodos probabilísticos, que possibilitam a quantificação do desempenho das soluções obtidas e, conseqüentemente, a obtenção do plano de expansão mais confiável.

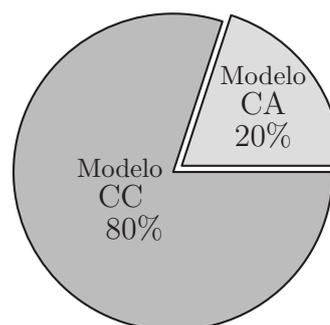
Como consequência dos possíveis modelos adotados para a resolução do problema do PET, em resumo, é apresentado um panorama geral das abordagens recentes encontradas na literatura especializada em Gomes e Saraiva (2019), referente às publicações que ocorreram em 2018, 2017 e antes de 2016 e que correspondem ao total de 16, 30 e 28 publicações avaliadas no respectivo período. A Figura 1 apresenta o uso dos modelos do PET, os quais são divididos em determinístico, probabilístico e incerto, sendo este último modelo caracterizado pela falta de conhecimento de alguns dados pertinentes ao problema. A Figura 2 apresenta o percentual equivalente à adoção do modelo CA e ao modelo CC para a determinação do fluxo de potência nos modelos da Figura 1. Por fim, a Figura 3 faz uma divisão entre as principais técnicas e métodos utilizados na resolução do PET.

Figura 1 – Modelos abordados nos recentes problemas do PET.



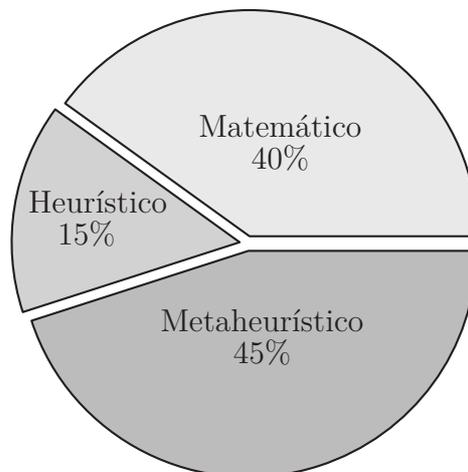
Fonte: Figura elaborada com base em Gomes e Saraiva (2019).

Figura 2 – Modelos de fluxo de potência usados nos problemas do PET.



Fonte: Figura elaborada com base em Gomes e Saraiva (2019).

Figura 3 – Métodos e técnicas aplicadas aos problemas do PET.



Fonte: Figura elaborada com base em Gomes e Saraiva (2019).

Em relação aos métodos e técnicas utilizados no PET, a literatura apresenta uma variedade de algoritmos que podem ser organizados em três classes da seguinte forma:

- **Algoritmos de Otimização Clássica:** empregam técnicas de decomposição matemática que, geralmente, possibilitam a obtenção das soluções ótimas globais. Porém, a aplicação dos algoritmos elencados requer alteração na modelagem do problema referente às variáveis de decisão que, por natureza, são singulares e apresentam dois valores característicos (0 e 1), para variáveis de valores contínuos. Dessa forma, é requerido um grande esforço computacional que se torna um empecilho para resolver o PET relacionado a sistemas de médio e grande porte, como é a maioria dos sistemas de transmissão reais. Estes métodos são usados em Gan et al. (2019), Domínguez et al. (2017), Lumbreras et al. (2017), Mínguez e García-Bertrand (2016).
- **Algoritmos Heurísticos Construtivos (AHCs):** caracterizados pela sua simplicidade na formulação, estes algoritmos consistem em procedimentos metodológicos que, normalmente, utilizam indicadores de desempe-

nho/sensibilidade para realizar a tomada de decisão, resultando em soluções viáveis com reduzido esforço computacional. Embora as soluções obtidas pelos AHCs sejam de boa qualidade, a abordagem em sistemas de grande porte e/ou em sistemas reais evidencia a casualidade de obtenção de soluções ótimas globais, conforme apontam alguns trabalhos apresentados na literatura especializada (PLOUSSARD et al., 2020; GOMES; SARAIVA, 2020; ZHANG; CONEJO, 2018; WU et al., 2018; ROLDÁN et al., 2018).

- **Metaheurísticas:** consistem em técnicas heurísticas aprimoradas, em que os procedimentos adotados são, normalmente, inspirados em mecanismo. Esses algoritmos têm-se mostrado eficientes em problemas caracterizados pela estrutura multimodal, cuja capacidade de obtenção das soluções ótimas e subótimas tem favorecido sua utilização em problemas do PET. As estratégias intrínsecas às metaheurísticas contribuem para o seu bom desempenho na busca global; contudo, tal processo requer elevado esforço computacional. Estas abordagem podem ser verificadas em Alvarez et al. (2019), Nemati et al. (2018), Baharvandi et al. (2018), Verma e Mukherjee (2017).

Um resumo das vantagens e desvantagens das técnicas de resolução é apresentado na Tabela 1, na qual é analisada a característica de cada técnica mediante seu desempenho nos seguintes critérios: (i) porte do sistema de transmissão a ser expandido; (ii) obtenção da solução ótima e (iii) esforço computacional.

Tabela 1 – Vantagens e desvantagens dos métodos de resolução.

Método	Matemático	Heurístico	Metaheurístico
Porte do sistema	médio	grande	grande
Solução ótima	geralmente encontra	raramente encontra	capaz de encontrar
Esforço computacional	alto	baixo	alto

Fonte: Gomes e Saraiva (2019).

Portanto, mediante a análise da Tabela 1, é possível perceber que a elabora-

ção de algoritmos/técnicas capazes de conciliar a obtenção de soluções de qualidade, independentemente do tamanho do sistema com baixo esforço computacional, é um campo atrativo para o desenvolvimento da pesquisa, o que implica a motivação para o estudo e para o aperfeiçoamento de técnicas heurísticas aplicadas ao problema da expansão de sistemas de transmissão de energia elétrica.

Dentre as opções de abordagem do problema PET apresentado, este trabalho tem como objetivo realizar o planejamento com o horizonte de longo prazo para a modelagem do problema estático e determinístico de expansão. Devido ao aspecto do planejamento, que permite o uso de fluxo de potência aproximado, é adotado o modelo linearizado, a fim de definir o fluxo de carga e as perdas dos sistemas, que apresenta como vantagem o baixo esforço computacional.

1.2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A investigação na área relacionada ao planejamento da expansão de sistema de transmissão mostra-se atrativa em decorrência das inúmeras pesquisas apresentadas ao longo das últimas décadas, que ainda permanecem despertando interesse na comunidade acadêmica e nas indústrias de energia que atuam na área desenvolvendo tanto trabalhos quanto pesquisas sobre o tema. A seguir, serão apresentados, em ordem cronológica, alguns dos mais recentes trabalhos relacionados ao problema PET que foram publicados na literatura especializada.

Rouhani et al. (2014) propuseram um planejamento simultâneo da expansão de geração e de transmissão de energia elétrica, sendo considerada a geração distribuída. A formulação do problema é realizada por meio da Programação Linear Inteira Mista (PLIM) e um novo AHC é proposto para solucioná-lo. O problema em questão é resolvido quando é obtido um custo total minimizado que corresponde à definição do plano de expansão de sistema de transmissão e da alocação de todas as unidades geradoras nas barras do SEP. A avaliação da estratégia é proposta mediante o estudo do SEP Iraniano, representando um sistema de grande porte.

Os estudos de Akbari e Bina (2014) mostram a adoção do modelo CA para o fluxo de potência ótimo e o aplicaram no planejamento dinâmico do sistema de

transmissão. Para resolver o problema, os autores transformam o problema base, que é de programação não linear inteira mista, em um problema de programação linear inteira mista, que foi aplicado em três estudos de casos, englobando o sistema Garver e o IEEE 24 barras (RTS).

Sousa e Asada (2015) abordaram o problema do PET por intermédio do modelo estático utilizando a técnica metaheurística, que é baseada no algoritmo evolutivo para determinar o plano final de expansão, considerando, assim, distintos cenários de despacho das unidades geradoras. Os autores propuseram, neste trabalho, que os planos obtidos possibilitem uma operação flexível do sistema.

Mortaz et al. (2015) utilizaram a interpolação multivariada para determinar o custo de operação do planejamento dinâmico da expansão de sistemas de transmissão, considerando uma variação da demanda e do preço do combustível com discretização horária e diária, respectivamente. Para resolver esse problema, foi proposto o uso do algoritmo binário de Otimização via Enxame de Partículas (*Particle Swarm Optimization*, em inglês) (PSO). O horizonte de planejamento foi de dez anos e os sistemas avaliados foram o Garver e o IEEE 24 barras.

Um planejamento coordenado da expansão de sistemas de geração e de transmissão associado à incerteza da geração eólica foi apresentado por Hemmati et al. (2016). O gerenciamento do planejamento é realizado em dois níveis: mestre (verificação das restrições) e escravo (maximização do lucro), e uma função de distribuição de probabilidade normal é inserida no modelo a fim de representar a incerteza do vento. O modelo do problema é resolvido pelo método PSO.

Zhan et al. (2017) propuseram a abordagem estocástica do problema do PET com o intuito de representar as incertezas associadas à previsão do vento e da carga. O problema proposto caracteriza-se por ser um de programação inteira mista e, para solucionar o problema, foi proposto pelos autores o uso do Algoritmo de seleção direta melhorado (*Improved Forward Selection Algorithm*, em inglês) (IFSA). Para contornar a dificuldade imposta pelo tamanho do sistema, foi utilizada a decomposição de *Benders* a fim de dividir o PET em um problema mestre a vários problemas escravos, sendo proposta uma linearização para resolver os problemas escravos. A comunicação entre os problemas divididos ocorre através da transferência dos multiplicadores de Lagrange, associados aos problemas escravos,

para o problema mestre. Os autores utilizaram sistemas de médio e de grande porte para avaliar o desempenho da IFSA e, também, sistemas de 24, 300 e 2.383 barras para a avaliação do método de linearização.

Zhang e Conejo (2018) consideraram incertezas de longo e curto prazo para determinar o conjunto de linhas de transmissão a fim de compor o plano de expansão do PET. A técnica utilizada corresponde à Otimização Robusta Ajustável (*Adaptive Robust Optimization*, em inglês) (ARO) e a representação das incertezas corresponde à demanda e à geração para o horizonte de longo prazo, enquanto as incertezas de curto prazo são representadas por um conjunto de cenários referentes a diferentes condições operacionais.

Em 2019, foi proposto por Gan et al. (2019) um co-planejamento que relaciona o problema do PET com a implantação de sistemas de armazenamento de energia, considerando alta penetração de geração eólica. O problema é formulado através do PLIM e utiliza a decomposição de Benders para determinar o plano de expansão ótimo, bem como novos sistemas de armazenamento de energia, a fim de garantir uma operação viável a um custo de investimento reduzido.

Zambrano et al. (2019) fizeram uso da técnica de simulação de modelo comportamental e dividiram o PET em duas abordagens de planejamento, que são: (i) planejamento centralizado, que visa à melhoria da confiabilidade do sistema, sendo o investimento realizado de forma centralizada; (ii) planejamento descentralizado, que promove o investimento por meio do uso de penalizações e compensações. Cumpre salientar que os autores avaliaram o modelo estratégico apresentado mediante sua aplicação no sistema colombiano.

Alvarez et al. (2019) propuseram uma abordagem mais detalhada do problema PET e a implementação de tecnologias e geração variável, sendo possível considerar outras opções de expansão, tais como: o aumento de tensão e a adição de compensação série, adotando como horizonte do planejamento o período de 15 anos. A técnica utilizada é a metaheurística baseada na Otimização por Colônia de Formigas (*Ant Colony Optimization*, em inglês) (ACO), e os sistemas abordados consistem no Garver e no sistema teste IEEE 118 barras que foi modificado para a modelagem proposta.

Um modelo CA aproximado de fluxo de potência é apresentado por Arabpour

et al. (2019) a fim de adicionar ao PET o planejamento de fornecimento de energia reativa considerando o investimento em energia eólica. Para a resolução do problema proposto, foi utilizado o algoritmo *K-means*; e os sistemas IEEE de 24 (RTS) e 118 barras foram utilizados para validar a técnica.

Zhang et al. (2019) utilizaram a técnica de programação cônica de segunda ordem, baseada no modelo CA relaxado para abordar o problema do PET associado ao planejamento da geração e energia reativa. A busca por um plano de expansão que resulte em uma topologia flexível e no melhor aproveitamento da energia eólica é o objetivo deste trabalho.

Foi proposta por Yuan et al. (2020) uma abordagem probabilística do PET, que considera a inserção de reatores como compensação série, a fim de melhorar a flexibilidade do sistema de transmissão e incertezas relacionadas à demanda é a velocidade do vento. Para contornar a característica de programação não linear e inteira mista do problema, é proposta a linearização via decomposição de Benders e, então, resolvido o problema em dois estágios: (i) no primeiro estágio, é obtida a decisão ótima relacionada à expansão de linhas de transmissão e reatores; (ii) o segundo, por sua vez, é caracterizado pela inserção dos cortes Benders.

Esmaili et al. (2020) propuseram a inserção de Compensador Série Controlado a Tiristores (*Thyristor-Controlled Series Compensators*, em inglês) (TCSC) e Limitadores de Corrente de Curto-Circuito Supercondutores (*Superconducting Fault Current Limiters*, em inglês) (SCFL) ao modelo do PET, com a proposta de minimizar o custo de expansão e torná-lo mais eficiente. Para viabilizar computacionalmente a resolução deste problema Programação Não Linear Inteira Mista (PNLIM), foi proposta a linearização sucessiva por meio da decomposição de Benders.

Os recentes trabalhos que foram apresentados anteriormente possibilitam identificar, não só as variações propostas ao modelo do PET, mas também as diversas técnicas e métodos propostos para a sua resolução, que visam à determinação do plano final de expansão que resulte no menor custo de investimento, a fim de viabilizar o empreendimento e otimizar os gastos do SEP decorrentes do atendimento à demanda.

Com o objetivo de apresentar trabalhos de impacto que relacionam com a

abordagem da técnica proposta para a resolução e da modelagem do problema do PET, serão expostos, a seguir, os principais trabalhos que foram norteadores para o desenvolvimento da técnica apresentada nesta tese, que é baseada em Heurísticas Construtivas (HCs).

1.2.1 Trabalhos relacionados: Heurísticas construtivas

A busca pela resolução do problema do PET, devido à sua complexidade, propicia investigações de técnicas que combinam soluções de boa qualidade e um bom desempenho computacional. Dentre as técnicas, destaca-se o AHC, que consiste em um procedimento passo a passo em que o reforço (transformador/linha de transmissão) candidato à expansão é adicionado a cada etapa. O reforço adicionado é escolhido através de um indicador de sensibilidade ou de desempenho, que permite avaliar e identificar a opção mais econômica dentre os reforços candidatos à expansão.

O processo de otimização baseado na HC é iniciado com a topologia base do sistema de transmissão e com a previsão de carga futura. Em cada etapa do processo de resolução, um reforço é adicionado e a topologia é atualizada. O processo é considerado concluído quando o sistema de potência opera adequadamente com a topologia atualizada, ou seja, a partir do plano de expansão obtido, torna-se viável o atendimento da previsão de demanda ao longo do horizonte de planejamento pelas unidades de geração existentes no sistema.

Em geral, esses algoritmos geralmente obtêm boas soluções para pequenos sistemas de transmissão de energia elétrica e soluções de qualidade razoável para sistemas de médio e grande porte. Tais algoritmos são importantes pelos seguintes motivos: *(i)* são robustos e de fácil compreensão; *(ii)* apresentam baixo esforço computacional; *(iii)* algumas características, propriedades e resultados fornecidos por esses algoritmos podem ser usados no desenvolvimento de abordagens mais complexas.

Dentre as HCs, a diferença mais significativa está relacionada aos indicadores de desempenho (sensibilidade) e ao modelo de fluxo de potência adotado. As principais técnicas de Heurística Construtiva (HC) utilizadas para solucionar o problema do PET são detalhadas a seguir em ordem cronológica.

(GARVER, 1970) apresentou a formulação do problema do PET com fluxo de potência e um algoritmo de programação linear para encontrar as rotas de expansão, fazendo a representação da rede através do modelo de transporte. Esse modelo satisfaz somente à primeira Lei de Kirchhoff. Trata-se, portanto, de um modelo relaxado. A principal vantagem do modelo de transporte é que, praticamente, não existe diferença entre resolver problemas conexos e altamente ilhados. Essa característica se deve ao fato de a solução deste modelo não depender das reatâncias dos circuitos e, como desvantagem, a solução encontrada pelo modelo pode ser menos adequada para o problema real.

Monticelli et al. (1982) propuseram a aplicação de métodos iterativos ao problema do PET, que consistem em um Algoritmo Heurístico Construtivo (AHC), denominado Algoritmo de Mínimo Esforço, cujo fluxo de potência é determinado por meio do modelo CC. Nesse AHC, as rotas candidatas à expansão foram ordenadas por meio de um índice de "Mínimo Esforço", que reflete a sensibilidade em relação às susceptâncias dos circuitos ao avaliar os caminhos de investimento para a expansão de sistema de transmissão.

Posteriormente, foi apresentado por Villasana et al. (1985) uma modelagem que representa duas redes elétricas sobrepostas com a finalidade de resolver o planejamento da expansão de sistemas de transmissão, combinando o modelo CC e o modelo de transporte. A integração entre os modelos ocorria da seguinte forma: enquanto o modelo linearizado foi utilizado no cálculo do fluxo de potência nos circuitos existentes, o modelo de transporte foi utilizado nos circuitos artificiais ou fictícios. Dessa forma, foi feita a estimação dos fluxos de potência ativa na rede fictícia sendo esta a maior contribuição desse trabalho, eliminando-se a dificuldade dos sistemas ilhados.

No mesmo ano, Pereira e Pinto (1985) propuseram um AHC denominado "Mínimo Corte de Carga". Tal algoritmo possibilitava a identificação do circuito que, uma vez adicionado ao sistema, minimizava o corte de carga. Para contornar os problemas de operação do sistema, foi adotada a inclusão de geradores fictícios.

Romero e Rocha (1999) apresentaram um AHC para o estudo do PET estático. A abordagem sugerida por eles usou uma combinação de indicadores de sensibilidade com as principais características dos AHCs apresentados anteriormente.

Os bons resultados obtidos e o desempenho da heurística foram avaliados através de simulações de sistemas de transmissão difundidos na literatura.

Em 2005, foi proposto um novo AHC por Romero et al. (2005) para solucionar o problema do PET cuja ideia é baseada no trabalho desenvolvido por (GARVER, 1970). O autor utilizou, porém, o modelo CC em vez de modelo de transporte. A eficiência da estratégia heurística foi avaliada a partir da realização de testes para sistemas conhecidos na literatura.

Oliveira et al. (2005), por sua vez, implementaram um AHC envolvendo a modelagem de Fluxo de Potência Ótimo (FPO), que utiliza a técnica do ponto interior primal-dual para determinar a melhor estratégia de investimento para o problema do planejamento da expansão de sistemas de transmissão de energia elétrica. Neste caso, a decisão de expansão é dada por uma função sigmoide inserida nas equações de fluxo de potência, cuja sensibilidade obtida no FPO norteia o modelo heurístico construtivo adotado.

Gomes e Saraiva (2015) propuseram uma técnica híbrida de duas fases para resolver o PET. A primeira fase usa uma heurística construtiva baseada no algoritmo de Garver (GARVER, 1970) e no algoritmo de Mínimo Esforço para reduzir o espaço de busca. Na sequência, após a determinação do espaço de busca reduzido, a segunda fase utiliza a metaheurística PSO para identificar o plano de expansão final. Essa abordagem mostrou-se eficaz e com um bom desempenho. Seguindo a mesma linha de pesquisa, uma nova metodologia e sua atuação para redução do espaço de busca foi apresentada por Gomes e Saraiva (2016). Foi proposta, no referido trabalho, a análise do desempenho de uma heurística construtiva agregada a uma versão discreta do PSO, sendo destacadas a aplicação e a comparação dos resultados considerando os modelos CC e CA de fluxo de potência.

Mendonça et al. (2016) descrevem uma estratégia que visa a redução do espaço de busca e a inicialização do processo de otimização multimodal para resolver o problema do PET. A metodologia proposta faz uso de um AHC baseado em um portfólio de índices, em que as decisões de expansão são relaxadas e representadas por uma função tangente hiperbólica. Por meio da adoção de diferentes inclinações para a função tangente hiperbólica, associada aos principais índices de sensibilidade

existentes na literatura, foi possível extrair um conjunto reduzido de alternativas de expansão e de soluções factíveis. A solução final do problema do PET deste método é obtida através de um algoritmo PSO.

Ploussard et al. (2020) expuseram uma técnica para obter um conjunto reduzido de circuitos candidatos à expansão de um sistema de transmissão que têm como opção de expansão as linhas de transmissão CA e CC. Para contornar a diferença na transmissão, no primeiro passo, é considerado o problema PET relaxado a fim de determinar as linhas de transmissão a serem construídas. No segundo passo, é utilizado o modelo CC a fim de determinar o fluxo de potência nas linhas CA selecionadas no passo anterior. Quando a metodologia atinge o critério de convergência, são definidas a quantidade de linhas de transmissão CA e CC e o caminho, resultando na redução do espaço de busca para a expansão de sistemas de transmissão.

Foi proposto por Gomes e Saraiva (2020) um novo AHC para lidar com a natureza dinâmica das decisões de investimento, bem como o critério de contingência único para o problema do PET, baseado no modelo CA de fluxo de potência. A estrutura híbrida, devido à utilização do AHC proposto combinado com uma metaheurística, foi capaz de reduzir o tempo de resolução do problema em quase 50%.

Isso posto, motivado pela eficiência computacional da HC e diante da aplicabilidade dos métodos heurísticos no problema do PET, este trabalho apresenta uma nova estratégia de solução baseada em um novo AHC.

1.3 MOTIVAÇÃO DA PESQUISA

O problema do planejamento da expansão de sistemas de transmissão de energia elétrica caracteriza-se, por natureza, como um problema de programação não linear inteira mista, que se associa ao fenômeno combinatório relacionado à disponibilidade de reforços candidatos à expansão, tornando-o um problema de difícil resolução. Portanto, técnicas que conseguem superar tais dificuldades e determinar soluções viáveis para a expansão, que resultam em um custo de investimento reduzido atrelado a um bom desempenho computacional, são premissas

motivadoras para o desenvolvimento da pesquisa na área.

Sendo assim, uma técnica capaz de melhorar a exploração da região de solução é apresentada. Esta melhora no processo de exploração da região de solução caracteriza-se pelo refinamento do plano de expansão (solução) realizado pela heurística proposta, que possibilita a investigação em dois níveis, a fim de combinar o desempenho computacional com a redução do custo de investimento.

1.4 OBJETIVOS DA PESQUISA

Baseado nas aplicabilidades das técnicas heurísticas em sistema de grande porte e no reduzido esforço computacional requerido, o principal objetivo do presente trabalho é de contribuir com o aprimoramento de técnicas heurísticas construtivas por meio de duas inovações, que consistem na: (i) Heurística Construtiva em Dois Níveis (HCDN); (ii) proposta de um indicador de desempenho. Os procedimentos estabelecidos entre as inovações mencionadas colaboram para a melhora do desempenho da técnica proposta na busca pelo plano ótimo de expansão. A HCDN, em conjunto com a técnica de otimização baseada no Método de Pontos Interiores (MPI), é aplicada ao problema não linear considerado para o PET. Portanto, os objetivos da HCDN consistem:

- na modelagem da variável binária de decisão por uma variável contínua representada por uma Função Tangente Hiperbólica (FTH) modificada com possibilidade de variação na sua inclinação;
- na variação da inclinação da FTH no decorrer da execução do algoritmo, a fim de determinar um conjunto de soluções candidatas de maior qualidade e sensibilidade;
- na minimização do custo de investimento da expansão de sistemas de transmissão por meio da exploração da região de solução do PET, que é realizada em dois estágios: (i) **Estágio 1:** refere-se à busca global para determinar a construção dos melhores reforços dentre os candidatos, resultando na definição da melhor inclinação da FTH; (ii) **Estágio 2:** faz a busca local em torno da

inclinação definida no estágio anterior e, ao finalizar o processo, determina o plano ótimo de expansão de sistemas de transmissão.

Tais objetivos contribuem para que a técnica proposta seja eficiente, robusta e apresente um bom desempenho computacional, ou seja, contribuem para que a HCDN obtenha soluções ótimas para sistemas de transmissão de qualquer dimensão sem comprometer o tempo computacional requerido para resolver o problema do PET.

1.5 PUBLICAÇÃO DA PESQUISA

O desenvolvimento deste trabalho resultou na seguinte publicação:

- OLIVEIRA, E. da S.; SILVA JUNIOR, I. C.; OLIVEIRA, L. W. de; MENDONÇA, I. M. de; VILAÇA, P.; SARAIVA, J. T. A two-stage constructive heuristic algorithm to handle integer investment variables in transmission network expansion planning. **Electric Power Systems Research**, p. 106905, out 2020.

1.6 ORGANIZAÇÃO DA TESE

Neste capítulo, foram apresentadas as abordagens do problema PET, a revisão bibliográfica de trabalhos recentes, com objetivo de destacar as diferentes modelagem do problema, e as técnicas e métodos utilizados na sua resolução, além de serem expostos a motivação e o objetivo deste trabalho. Por fim, foi apresentada a publicação decorrente da pesquisa.

No capítulo 2, será apresentada a fundamentação teórica que propiciou o desenvolvimento deste trabalho, sendo dividida em: revisão de trabalhos relacionados às técnicas heurísticas construtivas e formulação do problema do PET adotado.

O capítulo 3 apresentará, de forma detalhada, a HCDN. São destacados os dois estágios característicos da técnica proposta, bem como a calibração dos parâmetros adotados. Por fim, a caráter exemplificativo da técnica, é detalhado o uso da HCDN na resolução do problema PET de um sistema teste.

No capítulo 4, serão descritos os estudos de casos, com o intuito de investigar o desempenho da técnica proposta. Os estudos compreendem, para alguns casos, as considerações do efeito das perdas ativas e do redespacho das unidades geradoras no planejamento da expansão de sistemas de transmissão. O custo de investimento referente ao plano final de expansão e o desempenho computacional são comparados com os encontrados na literatura especializada. A fim de representar sistemas de pequeno, médio e grande porte (sistemas reais), com base na literatura, foram escolhidos os sistemas: Garver (6 barras), IEEE 24 barras (cinco cenários de geração), Sul Brasileiro e o Colombiano.

No capítulo 5, por fim, serão apresentadas as principais considerações do trabalho e sugestões de pesquisas a serem desenvolvidas com o uso da HCDN.

2 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

Neste capítulo, a modelagem do problema do PET é apresentada, assim como o fluxo de potência adotado e a representação das perdas ativas no processo de transmissão de energia elétrica. Por fim, é apresentada a função de decisão de reforço (DR) utilizada para definir as expansões do sistema de transmissão.

2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O problema do planejamento estático da expansão de sistemas de transmissão de energia elétrica consiste na obtenção de uma topologia final ótima para o sistema de transmissão, a partir da definição do plano final de expansão, a fim de garantir o atendimento de todas as restrições estabelecidas pelo SEP ao menor custo de investimento possível.

2.2 MODELAGEM DO PROBLEMA DO PLANEJAMENTO DA EXPANSÃO DE SISTEMAS DE TRANSMISSÃO

A modelagem do problema do planejamento da expansão de sistemas de transmissão de energia elétrica implica um problema de otimização, que permita determinar o plano de expansão mais econômico em que conste os reforços necessários para que haja garantia do transporte de energia elétrica da geração para a carga e que assegure que as características do funcionamento do SEP satisfaçam seus limites operativos. Portanto, o problema de otimização a ser adotado é o de minimização, cujo objetivo é reduzir o investimento que atenda às premissas do PET abordado.

Para tratar da limitação do fluxo de potência a ser percorrido na linha de transmissão, é adotado o modelo CC, uma vez que permite, de forma simples, com esforço computacional reduzido e precisão aceitável (PARKER et al., 1980), determinar a distribuição do fluxo de potência ativa e perdas técnicas em uma rede de transmissão de energia elétrica. O modelo CC baseia-se no acoplamento entre a potência ativa e o ângulo de fase da tensão nodal ($P - \theta$).

A representação da variável de decisão de implementação do reforço é

inserida no modelo por meio da função denominada Decisão de Reforço (DR). O conjunto de circuitos existentes na topologia base é simbolizado por Ω_E e o conjunto de reforços (linhas de transmissão/transformadores) candidatos é representado por Ω_C . Portanto, o modelo do problema do PET aqui abordado é formulado pelas equações (2.1).

$$\text{Minimizar}_{x_l, r_m} \sum_{l=1}^{nc} k_l \cdot DR_l(x_l) + \sum_{m=1}^{nr} c_m \cdot r_m \quad (2.1a)$$

$$\text{Sujeito a: } G_i + r_i - \sum_{l \in \Omega_i} F_l = D_i \quad \forall i \in \Omega_B, \forall l \in \Omega_E \cup \Omega_C \quad (2.1b)$$

$$F_l = - \left(b_l \cdot \theta_l + g_l \cdot \frac{\theta_l^2}{2} \right) \quad \forall l \in \Omega_E \quad (2.1c)$$

$$F_l = -DR_l(x_l) \cdot \left(b_l \cdot \theta_l + g_l \cdot \frac{\theta_l^2}{2} \right) \quad \forall l \in \Omega_C \quad (2.1d)$$

$$F_l^{\min} \leq F_l \leq F_l^{\max} \quad \forall l \in \Omega_E \cup \Omega_C \quad (2.1e)$$

$$0 \leq G_i \leq G_i^{\max} \quad \forall i \in \Omega_B \quad (2.1f)$$

$$0 \leq r_m \leq r_m^{\max} \quad \forall m \in \Omega_B \quad (2.1g)$$

$$0 \leq x_l \leq x_l^{\max} \quad \forall l \in \Omega_C \quad (2.1h)$$

$$0 \leq DR_l(x_l) \leq 1 \quad \forall l \in \Omega_C \quad (2.1i)$$

Nesta formulação:

- nr : Número total de barras com geradores fictícios que representa o déficit de potência no sistema;
- nc : Número total de reforços candidatos;
- c_m : Custo do déficit de potência da unidade geradora fictícia m [\$/MW];
- k_l : Custo da construção do reforço candidato l [\$/];
- G_i : Potência gerada pela unidade geradora conectada à barra i [MW];
- G_i^{\max} : Limite máximo de geração da unidade geradora conectada à barra i [MW];
- r_m : Potência gerada pela unidade geradora fictícia conectada à barra m [MW];

- r_m^{\max} : Limite máximo de geração da unidade geradora fictícia conectada à barra m [MW];
- DR_l : Função de decisão de reforço l a ser construído, representando a variável de decisão binária $[0, 1]$;
- F_l : Fluxo de potência ativa no circuito/reforço l [MW];
- F_l^{\min}, F_l^{\max} : Limites de fluxo de potência ativa no circuito/reforço l [MW];
- D_i : Demanda de potência na barra i [MW];
- g_l : Condutância do circuito/reforço l [S];
- b_l : Susceptância do circuito/reforço l [S];
- θ_l : Diferença angular entre as barras terminais do circuito/reforço l [rad];
- x_l : Variável independente da função decisão de reforço para o reforço candidato l (DR_l);
- x_l^{\max} : Limite máximo da variável independente do parâmetro de expansão para o circuito candidato l ;
- Ω_i : Conjunto de reforços/circuitos conectados à barra i ;
- Ω_B : Conjunto de barras do sistema de transmissão;
- Ω_E : Conjunto de circuitos de transmissão existentes;
- Ω_C : Conjunto de reforços candidatos à expansão.

Nota-se que pela formulação do problema do PET, as variáveis de decisão consistem em r_m e x_l . Porém, para os sistemas que adotam o redespacho da geração no estudo do planejamento da expansão, conforme os estudos apresentados na seção 4.3, têm em sua modelagem a adoção da variável G_i como mais uma variável de decisão, pois necessita de redefinir o seu valor, de forma otimizada, para garantir a operação adequada do sistema.

Conforme as características adotadas na formulação do problema do PET, a modelagem acarreta um problema não linear, de modo que técnicas de PNL sejam requeridas para resolvê-lo. Baseado na literatura especializada, o método de otimização primal-dual de pontos interiores apresentou bom desempenho na resolução de problemas não lineares de grande porte (WU et al., 1994). Dessa forma, dentre as alternativas das técnicas de resolução de PNLs, foi definido o MPI como técnica de otimização a ser utilizada.

2.2.1 Função Objetivo (FOB)

Na modelagem proposta, a função objetivo correspondente à minimização do custo de investimento da expansão relacionado tanto aos custos dos reforços, que compõem o plano de expansão, quanto ao custo de déficit de energia elétrica, sendo representada pelo primeiro e pelo segundo termo da equação (2.1a), respectivamente.

Com o propósito de assegurar que não haja resultados potencialmente inviáveis, ou seja, que não possibilitem o atendimento à demanda, é inserido o segundo termo da equação (2.1a), que consiste na representação de geradores fictícios adicionados em cada barra de carga do sistema, cuja operação só será habilitada no caso em que a expansão do sistema, em função da inserção dos reforços, não garanta o atendimento à demanda. Dessa forma, o corte de carga é representado por uma geração de potência ativa fictícia, que é associada a um alto custo operacional, também conhecida como geração de déficit.

2.2.2 Restrição de balanço de potência ativa

A restrição de balanço de potência ativa permite verificar o estado da rede elétrica, pois pela adoção do fluxo de potência linearizado é avaliado o atendimento das duas leis de Kirchhoff, cuja satisfação destas implica a estabilidade da operação do sistema. Portanto, para cada barra, é analisado o atendimento da demanda solicitada através da geração e das perdas de potência relacionadas à conexão com a devida barra, de acordo com a equação (2.1b).

2.2.2.1 Fluxo de potência

O fluxo de potência associado a cada circuito, existente ou candidato, é determinado pelas equações (2.1c) e (2.1d), respectivamente. Na modelagem adotada, devido às simplificações do modelo CC, o fluxo de potência líquido do circuito l conectada à barra i permite a modelagem das perdas ativas no processo de transmissão de energia elétrica, e é definido com base no fluxo de potência ativa e de perdas ativas do referido circuito, que são identificados nas equações (2.1c) e (2.1d) pelo termo linear da diferença angular e pelo termo quadrático da diferença angular, respectivamente.

O fluxo de potência linearizado determinado para os reforços candidatos à expansão é ponderado pela função de DR, conforme apresenta a equação (2.1d). Nota-se que a partir do momento que o reforço candidato passa a integrar a topologia base do sistema de transmissão, agora expandido, a determinação do fluxo de potência deste reforço passa a ser igual ao fluxo de potência obtido para os circuitos da topologia base, visto que a função de decisão de reforço referente ao reforço candidato l assume o valor unitário ($DR_l = 1$).

2.2.3 Restrições de canalização

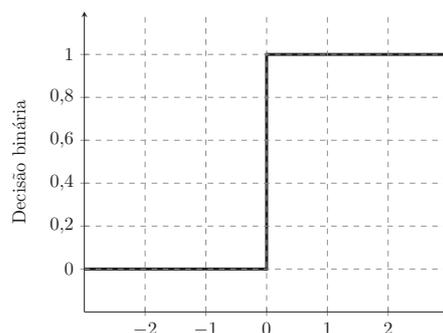
As restrições de canalização modelam os limites operativos definidos para o SEP, de modo que na formulação do problema do PET adotada, as variáveis que apresentam tais restrições são: (i) o limite superior e inferior do fluxo de potência ativa em cada circuito/reforço l , portanto, essa restrição é válida tanto para os circuitos existentes quanto para os reforços candidatos, conforme a equação (2.1e); (ii) os limites da geração de potência representados para unidade geradora, tanto existente quanto fictícia, são modelados pelas respectivas equações (2.1f) e (2.1g); (iii) os limites da variável independente (x_l) da função de decisão do reforço l (DR_l) são modelados pela equação (2.1h); (iv) a restrição que estabelece o valor inferior e superior da função de decisão de reforço l (DR_l), que assume valores compreendidos entre $[0, 1]$, é representada pela equação (2.1i).

2.2.4 Função de Decisão de Reforço

Considerando a característica do problema do planejamento da expansão de sistemas de transmissão de energia elétrica, a solução correspondente ao plano de expansão traz a identificação dos reforços a serem construídos para suprir as restrições do SEP. A definição do reforço, dentre os candidatos à expansão, é resultado da minimização do investimento relacionado à expansão obtida a partir da investigação das possibilidades de construção avaliadas no conjunto das opções candidatas. Verifica-se que esta decisão trata-se de uma representação binária, podendo atribuir a ao valor unitário à decisão de construção e o valor zero à decisão de não construção.

Caso a decisão de construção fosse modelada por uma variável binária de investimento, o problema deveria ser tratado como um problema de PNLIM. A função degrau unitário, exposta na Figura 4, representaria a decisão binária de investimento, neste caso. Entretanto, por ser uma função descontínua, sua utilização torna-se inviável.

Figura 4 – Decisão binária - função Degrau.



Fonte: Próprio autor.

Com base na heurística proposta por Garver (1970), foi adotada uma representação para o parâmetro relacionado à decisão de reforço (parâmetro de expansão), que permite assumir valores contínuos compreendidos no intervalo $[0, 1]$. A adoção de valores contínuos para o parâmetro de expansão também foi investigada por Silva Junior (2003), Oliveira et al. (2005) e Mendonça et al. (2016). O relaxamento da decisão de reforço, embora seja inaceitável para definir o plano final de expansão, permite a obtenção de indicadores interessantes na procura de boas propostas discretas e, principalmente, na utilização de técnicas de programação contínua para a resolução do problema do PET.

A FTH foi adotada para modelar a função de decisão de reforço (DR), porém foi necessária uma modificação na formulação da equação da função tangente hiperbólica para que os valores negativos, que pudessem ser assumidos pela FTH, não fizessem parte da região de solução. A escolha pela FTH é baseada nas seguintes características: (i) é uma função contínua ao longo de todo seu domínio; (ii) apresenta boa sensibilidade dos dois estados de decisão pertinentes ao problema

PET, cujo comportamento é similar ao da curva característica da função degrau; (iii) quando comparada com a função reta, o desempenho da FTH foi superior na determinação de propostas de expansão de sistemas de transmissão, (Silva Junior, 2003).

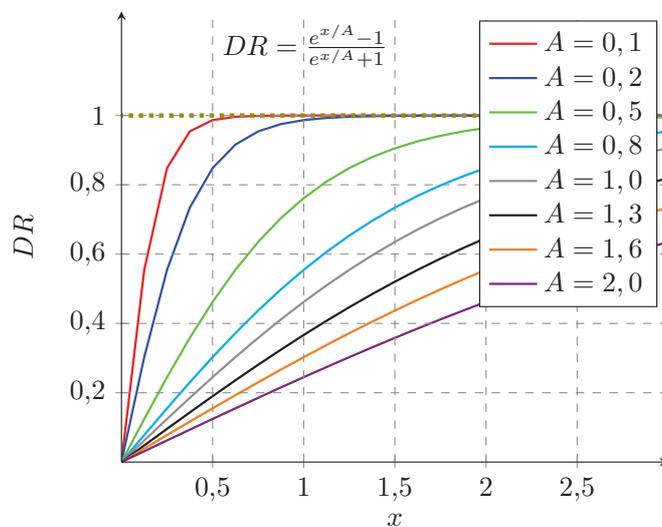
A fim de melhorar a exploração da sensibilidade da FTH, foi adotada a variação de inclinação dessa função, de modo que para cada inclinação é obtido um plano final de expansão de sistemas de transmissão (MENDONÇA et al., 2016). Por fim, a modelagem da função de decisão de reforço (DR) é definida pela equação (2.2) e, a caráter ilustrativo, a Figura 5 representa parte do comportamento da função de DR ao variar sua inclinação.

$$DR = \frac{e^{x/A} - 1}{e^{x/A} + 1} \begin{cases} x \in [x^{\min} : x^{\max}] \\ A \in [A^{\min} : S : A^{\max}] \end{cases} \quad (2.2)$$

Nesta equação:

- DR : Valor contínuo da função de decisão de reforço;
- x : Variável independente do função de decisão de reforço;
- x^{\min}, x^{\max} : Limites da variável independente;
- A : Coeficiente de ajuste da inclinação da função de decisão de reforço;
- A^{\min}, A^{\max} : Limites do coeficiente de ajuste da inclinação da função de decisão de reforço;
- S : Passo para o ajuste do coeficiente da inclinação da função de decisão de reforço.

Figura 5 – Função de decisão de reforço (DR) - exemplo ilustrativo.



Fonte: Próprio autor.

Com base na Figura 5, pode ser observada a alteração do comportamento da função de DR de acordo com a variação da inclinação (A). Tal comportamento leva à conclusão de que à medida que a inclinação aumenta, a curva da função de DR é suavizada.

A definição dos limites e do passo a ser adotado é detalhada no capítulo 3, em que são apresentadas a HC e a calibração dos parâmetros característicos.

2.3 CONCLUSÕES PARCIAIS

O problema do PET abordado refere-se ao planejamento estático e usa, na sua formulação, o modelo de fluxo de potência linearizado, que se baseia no acoplamento entre a potência ativa e o ângulo de fase da tensão nodal, e permite, de forma simples, determinar o fluxo de potência ativa em uma rede de transmissão com reduzido esforço computacional e precisão aceitável. Além disso, as perdas de potência ativa na transmissão de energia elétrica podem ser consideradas no modelo.

A função de decisão de reforço representa a decisão de construção dos

reforços (linha de transmissão/transformador) candidatos à expansão. O valor nulo desse parâmetro indica que o reforço candidato não é implementado/construído, e um valor unitário indica a implementação/construção do reforço. A fim de explorar a sensibilidade da inclinação, propiciada pela função de DR , é adotada uma variação em seu valor e determinado um plano final de expansão para cada inclinação. Tais procedimentos permitem, portanto, a obtenção de mais de uma solução pela heurística construtiva proposta e, conseqüentemente, uma maior assertividade.

3 HEURÍSTICA CONSTRUTIVA PROPOSTA

Neste capítulo é apresentada a Heurística Construtiva em Dois Níveis (HCDN), que consiste na técnica inovadora do presente trabalho, sendo detalhadas as suas etapas de acordo com a ordem de execução. A calibração dos valores dos parâmetros utilizados pela HCDN é fundamentada e, por fim, é mostrado o fluxograma da HCDN. Uma aplicação com análise detalhada da HCDN também é apresentada a fim de ilustrar o processo de resolução do problema pela técnica proposta.

3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Um processo heurístico, em termos gerais, consiste em etapas orientadas por meio de parâmetros/informações definidos com base que visam à resolução de um determinado problema. Portanto, um AHC aplicado ao problema do PET, consiste em um procedimento passo a passo que se inicia com uma topologia base e uma previsão de demanda futura. Em cada passo, baseado na informação proveniente do indicador de desempenho, um reforço dentre os candidatos é selecionado para ser implementado. Assim sendo, a topologia é então atualizada em cada passo de modo que o processo finaliza quando a demanda prevista para o horizonte de planejamento em estudo é atendida integralmente pelas unidades geradoras existentes no sistema elétrico de potência em análise.

Dentre os AHCs utilizados na resolução do PET as principais diferenças observadas na literatura estão relacionadas com o indicador de desempenho e a modelagem do fluxo de carga. Geralmente, o indicador de desempenho é um parâmetro que está associado com a variação da função objetivo em relação à modificação da topologia corrente (atualizada) do sistema de transmissão. Dessa forma, as características deste parâmetro podem ser resumidas: (i) na identificação dos reforços mais promissores para expandir o sistema de transmissão, com base na sua determinação qualitativa; (ii) na realização de busca local e, portanto, torna-se ineficiente na determinação da melhor estratégia global para expansão. Devido à desvantagem evidenciada pela segunda característica do indicador de desempenho, nota-se que os AHCs existentes apresentam dificuldade na obtenção da topologia

ótima global, principalmente, para sistemas de grande porte.

Em contrapartida, diante das vantagens das heurísticas construtivas, que estão relacionadas à robustez, facilidade de implementação e baixo esforço computacional, a investigação dessas técnicas aplicadas à resolução do PET é considerada promissora. Desse modo, quando forem consideradas pelo AHC a definição de soluções iniciais provenientes de sensibilidades diferentes (busca local) e a redução do espaço de busca (busca global) resultam na amplificação da vantagens associadas às técnicas. Esses procedimentos mitigam a difícil tarefa da obtenção de soluções de boa qualidade, sobretudo, para sistema de transmissão de grande porte.

Diante da complexidade para solucionar PET e visando contribuir com os estudos e desenvolvimentos de heurísticas construtivas, é proposto um novo AHC que atua na avaliação da possível construção de um reforço candidato mediante a adoção de procedimentos que contribuem com a melhoria da eficiência do processo busca.

3.2 A HEURÍSTICA CONSTRUTIVA EM DOIS NÍVEIS

A HCDN consiste em um método baseado em dois estágios que são propostos estrategicamente a fim de contornar o bloqueio ocasionado pela busca local e, associado a um indicador de desempenho, determinar a topologia que resulte na melhor solução para o sistema elétrico de potência em estudo. Tais estágios são caracterizados pela: (i) construção da solução; (ii) refinamento da solução. O detalhamento e a discussão dos estágios propostos são apresentadas nas subseções seguintes.

3.2.1 Estágio 1: Construção

Caracterizado pelo início do AHC, este estágio proporciona a exploração de toda a região de solução, realizando a busca global. Esta exploração ocorre através da obtenção da solução por meio da variação do coeficiente de inclinação (A), dentro dos limites estabelecidos, da FTH que foi adaptada para assumir valores positivos, a fim de representar a variável de decisão do problema ($0 \leq FTH \leq 1$). Desse modo, a FTH representa a decisão de investimento a ser considerada para

o referido reforço, cuja modelagem deste parâmetro qualitativo de decisão é feita pela variável denominada DR , que é modelada conforme a equação (3.1).

$$DR_l^1 = \frac{e^{x_l/A^1} - 1}{e^{x_l/A^1} + 1} \begin{cases} x_l \in [x^{\min} : x^{\max}] \\ A^1 \in [A^{\min} : S^1 : A^{\max}] \end{cases} \quad (3.1)$$

Nesta equação:

- DR_l^1 : Valor contínuo da função tangente hiperbólica na fase de construção associado ao reforço l ;
- x_l : Variável independente da função tangente hiperbólica relacionada ao reforço l ;
- x^{\min}, x^{\max} : Limites da variável de decisão da função tangente hiperbólica;
- A^1 : Coeficiente de ajuste da inclinação da função tangente hiperbólica no estágio 1;
- A^{\min}, A^{\max} : Limites do coeficiente de ajuste da inclinação da função tangente hiperbólica no estágio 1;
- S^1 : Passo para o ajuste do coeficiente da inclinação da função tangente hiperbólica no estágio 1.

De acordo com a variação do coeficiente de inclinação (A) no Estágio 1, é determinado o valor contínuo de DR_l^1 que é associado a cada reforço candidato à expansão. Após a obtenção do indicativo de investimento dos reforços candidatos, a HCDN utiliza um dos indicadores de desempenho da literatura (MONTICELLI et al., 1982), no entanto, ponderado pelo valor de DR_l^1 e pelo inverso do custo de construção do reforço candidato em análise, conforme a equação (3.2). O objetivo deste indicador é de possibilitar uma métrica para estabelecer a ordem dos reforços mais relevantes a serem implementados e, de acordo com a necessidade, inseri-los na topologia corrente.

$$ID_l = \left| \frac{DR_l^1 \cdot 0,5 \cdot b_l \cdot \theta_l^2}{k_l} \right| \quad \forall l \in \Omega_C \quad (3.2)$$

Nesta equação:

- ID_l : Indicador de desempenho associado a cada reforço l [MW/\$].

A motivação principal pela escolha do indicador de desempenho apresentado pela equação (3.2) é sustentada pela obtenção de resultados de boa qualidade que foram determinados através de inúmeras simulações que usam esta heurística e, quando comparado, apresentou melhor desempenho que outros indicadores mencionados na literatura (MONTICELLI et al., 1982; PEREIRA; PINTO, 1985; ROMERO; ROCHA, 1999; OLIVEIRA et al., 2005; MENDONÇA et al., 2016). De acordo com Monticelli et al. (1982), o uso do indicador de desempenho original, que não considera DR_l^1 e k_l , é relevante, pois permite identificar o reforço candidato que ao ser inserido na topologia corrente do sistema propicia maior variação de fluxo de potência ativa, de modo que haja redução de sobrecarga na transmissão de energia elétrica do sistema elétrico.

Sendo assim, a determinação do reforço candidato mais promissor é definida pela equação (3.3), que caracteriza a decisão de expansão (DE), e é adicionado à topologia corrente; por consequência, o seu DR_l^1 correspondente é fixado no valor unitário durante o processo de solução restante. Portanto, este reforço é transferido do conjunto de reforços candidatos (Ω_C) para o conjunto de reforços existentes (Ω_E), desde que a decisão seja pela sua implementação. Os reforços candidatos remanescentes assumem o valor nulo para o seu DR_l^1 e a viabilidade operativa do SEP é verificada para as expansões correntes definidas.

$$DE_l = \max (ID_l) \quad \forall l \in \Omega_C \quad (3.3)$$

Nesta equação:

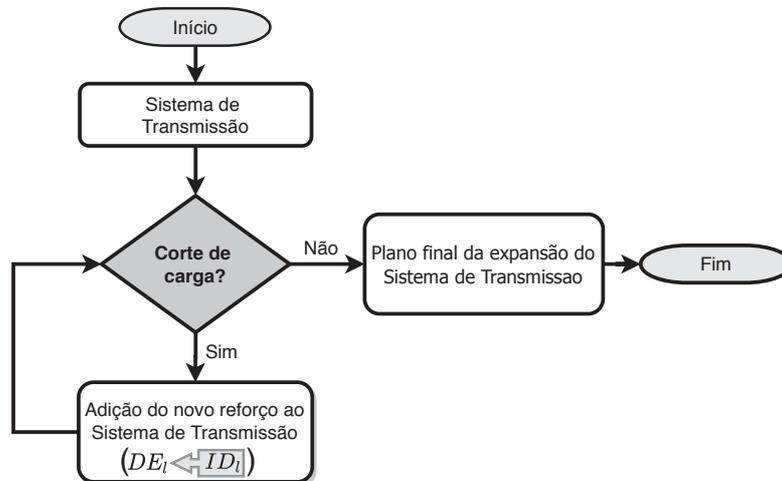
DE_l : Decisão de expansão do reforço l .

Caso o sistema apresente "corte de carga" (operação inviável), é realizada uma nova simulação da HCDN e então o próximo reforço a ser adicionado na topologia corrente é investigado e escolhido a partir do índice DE , conforme descrito anteriormente. Então, os reforços remanescentes são relaxados novamente de modo que o respectivo DR_l^1 seja habilitado a assumir qualquer valor dentro do seu intervalo $[0,1]$.

Resumidamente, os procedimentos descritos anteriormente são repetidos até que os reforços transferidos para o conjunto de reforços existentes viabilizem uma

topologia que possibilite a operação do sistema, por exemplo, uma operação sem corte de carga e que supra a demanda. É importante ressaltar que a decisão pela implementação do reforço é definida através da equação (3.3). O fluxograma da Figura 6 apresenta a organização dos procedimentos descritos, que são aplicados a cada inclinação (A^1) da função de DR_l^1 . No final, verifica-se qual inclinação originou a melhor solução (A^{1*}) e então inicia-se o Estágio 2, que estabelece a mesma heurística construtiva para definir o plano final de expansão.

Figura 6 – Heurística construtiva.



Fonte: Próprio autor.

3.2.2 Estágio 2: Refinamento

Após a identificação do valor do coeficiente de inclinação que proporciona o melhor plano de expansão do sistema de transmissão, através do Estágio 1 da metodologia proposta, inicia-se o Estágio 2, que assegura um refinamento da melhor solução encontrada até o momento. Este estágio objetiva a investigação da possibilidade de encontrar uma solução mais econômica, cuja estratégia consiste na aplicação de uma pequena variação ($\pm\Delta$) em torno do valor ótimo do coeficiente

de inclinação (A^{1*}) obtido no estágio anterior, de acordo com a equação (3.4).

$$DR_l^2 = \frac{e^{x_l/A^2} - 1}{e^{x_l/A^2} + 1} \begin{cases} x_l \in [x^{\min} : x^{\max}] \\ A^2 \in [(A^{1*} - \Delta) : S^2 : (A^{1*} + \Delta)] \end{cases} \quad (3.4)$$

Nesta equação:

- DR_l^2 : Valor contínuo da função tangente hiperbólica na fase do refinamento (Estágio 2) associado ao reforço l ;
- A^2 : Coeficiente de ajuste da inclinação da função tangente hiperbólica no Estágio 2;
- A^{1*} : Coeficiente da inclinação ótima do Estágio 1;
- Δ : Variação em torno do A^{1*} para a inclinação da função tangente hiperbólica no Estágio 2;
- S^2 : Passo para o ajuste do coeficiente de inclinação da função tangente hiperbólica no Estágio 2.

A princípio, no Estágio 2 todos os reforços candidatos à expansão são avaliados e para cada reforço é definido um valor contínuo para DR_l^2 , com base na variação do coeficiente de inclinação deste estágio (A^2).

Portanto, a heurística construtiva baseada no atendimento à demanda, que foi descrita no Estágio 1 e está representada pela Figura 6, é executada novamente, porém, neste estágio é aplicado um passo menor (S^2) e, conseqüentemente, ocorre a limitação de variação do valor da função tangente hiperbólica (DR_l^2). Desse modo, o indicador de desempenho, equação (3.2), passa a ser definido em função de DR_l^2 e, conseqüentemente, a decisão de expansão também, equação (3.3). Este procedimento pode ser interpretado com realização de uma busca local/refinamento nas proximidades da inclinação A^{1*} , referente a melhor inclinação obtida no Estágio 1, que proporcionou o custo de investimento mais econômico no Estágio 1.

Ao finalizar o Estágio 2, a HCDN determina a melhor inclinação proveniente do refinamento na busca pela solução (A^{2*}) e, vinculado ao valor da inclinação, são definidos os reforços a serem adicionados à topologia que asseguram o atendimento à demanda com o menor custo de investimento. Portanto, para a técnica proposta, no final do Estágio 2, é obtido o planejamento ótimo para o sistema de transmissão de energia elétrica.

3.2.3 Fluxograma geral da heurística construtiva proposta

Conforme apresentado, o algoritmo heurístico construtivo proposto para solucionar o problema do PET é dividido em duas fases, que caracterizam a construção dos reforços candidatos à expansão e o refinamento dos reforços candidatos através da investigação local em torno da melhor inclinação da função de DR_i^1 ; estas fases são representadas pelos Estágio 1 e Estágio 2, respectivamente. A seguir, é apresentado na Figura 7 o fluxograma da HCDN aplicado ao problema do PET.

Os passos que caracterizam o algoritmo apresentado na Figura 7 estão detalhados na sequência:

Passo 1: A HCDN é iniciada através da atribuição do valor do coeficiente de inclinação do Estágio 1 (A^1), cujo valor corresponde ao limite inferior deste coeficiente, e da inicialização da contagem dos planos de expansão (C) referentes à fase de construção (Estágio 1);

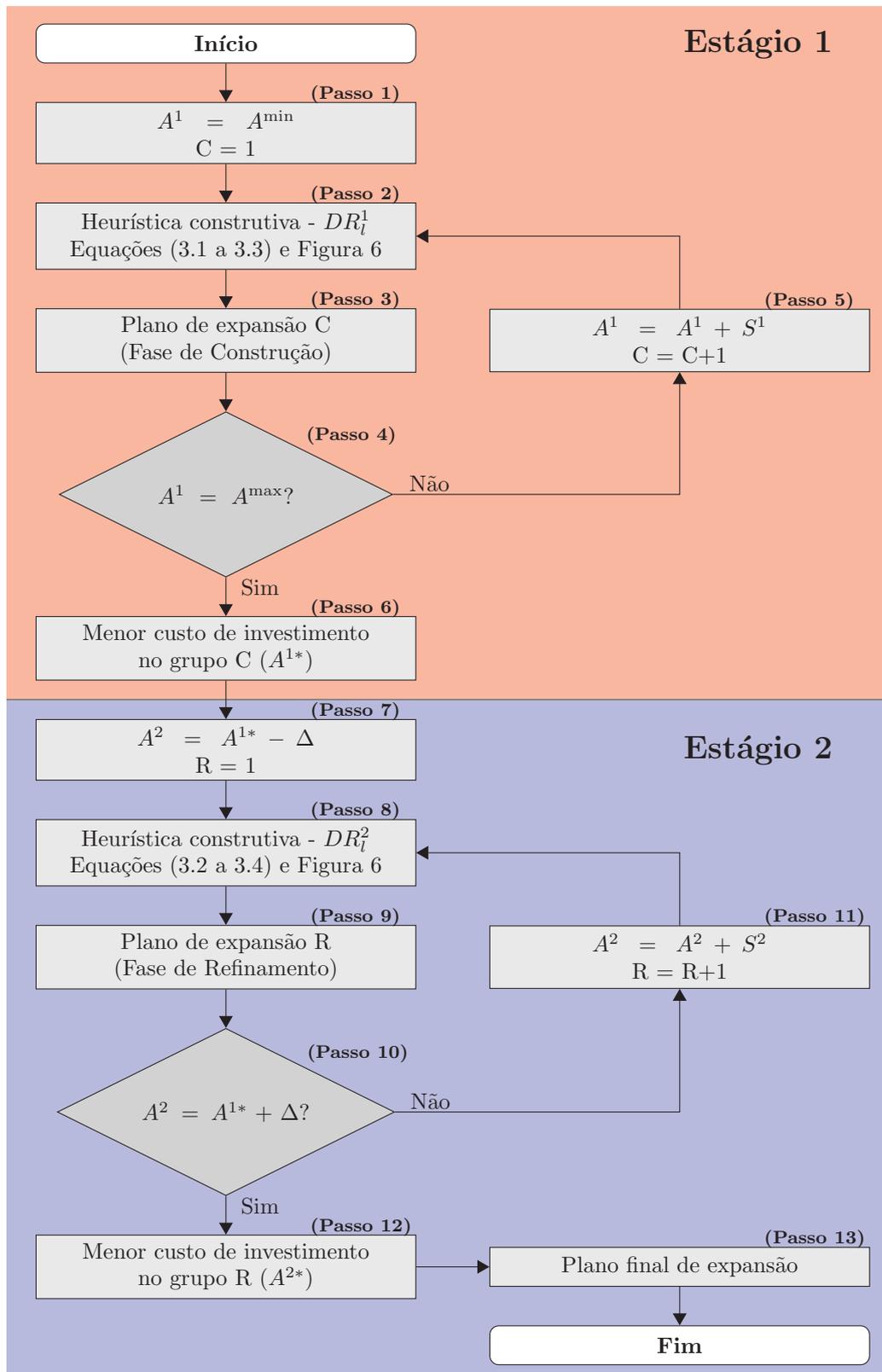
Passo 2: Baseada na heurística construtiva apresentada na Figura 6, cuja tomada de decisão está vinculada às equações (3.1) a (3.3), são inseridos os reforços necessários a partir da execução do fluxo de potência linearizado, estabelecendo o plano de expansão;

Passo 3: É determinado o plano de expansão (C) que indica os reforços a serem inseridos através da análise da inclinação A^1 da fase de construção, com o respectivo custo de investimento, armazenado para posterior análise (**Passo 6**);

Passo 4: Nesta etapa de decisão é avaliado se o coeficiente de inclinação A^1 chegou no seu limite superior. Se ainda não satisfizer à restrição, ou seja, não atingir o valor máximo de inclinação A^{\max} , é realizado o **Passo 5**, caso contrário, prossegue para o **Passo 6**;

Passo 5: Ocorre a atualização da inclinação A^1 , de acordo com o passo S^1 , e da contagem do plano de expansão (C) deste estágio através do incremento unitário;

Figura 7 – Fluxograma da Heurística Construtiva em Dois Níveis.



Fonte: Próprio autor.

- Passo 6:** Ao final da análise de todas as inclinações propostas para o Estágio 1 e, conseqüentemente, da definição dos planos de expansão associado ao seu custo de investimento, compondo o grupo C, é determinado o menor custo de investimento do grupo C e a inclinação que propiciou a obtenção deste custo (A^{1*});
- Passo 7:** Este passo representa o início da fase do refinamento (Estágio 2), sendo definido o valor inicial para a inclinação (A^2) em função da melhor inclinação do estágio anterior (A^{1*}) e de uma pequena variação (Δ). Também é definido o valor inicial de R para contabilizar os planos de expansão deste estágio;
- Passo 8:** Novamente, é executada a heurística construtiva, Figura 6, porém, considerando as equações (3.2) a (3.4) para ponderar a tomada de decisão da adição dos reforços, executando do fluxo de potência linearizado para validação da decisão e, conseqüentemente, definição de um novo plano de expansão;
- Passo 9:** É obtido o plano de expansão R, indicando os reforços a serem inseridos através da análise da inclinação A^2 e o respectivo custo de investimento;
- Passo 10:** É avaliada a variação da inclinação A^2 , de modo que, caso ainda não tenha atingido o limite superior, os parâmetros referentes ao Estágio 2 são atualizados (**Passo 11**), caso contrário, segue para o **Passo 12**;
- Passo 11:** São atualizados o coeficiente de inclinação A^2 , com base no passo S^2 , e o valor correspondente à contagem do plano de expansão (R), através de acréscimo unitário;
- Passo 12:** É identificado o menor custo de investimento e o correspondente coeficiente de inclinação (A^{2*}), a partir da investigação de todos os planos de expansão associados à A^2 ;
- Passo 13:** É definido o plano de expansão mais econômico para o PET pela HCDN.

3.2.4 Calibração da Heurística Construtiva em Dois Níveis

A HCDN teve todos os seus parâmetros definidos a partir da análise dos resultados obtidos das simulações exaustivas do algoritmo. Esses parâmetros são: (i) os limites das variáveis independentes (x^{\min} , x^{\max}) das FTHs adaptadas que representam as decisões de reforços em cada estágio (DR_l^1 , DR_l^2); (ii) os limites do coeficientes de inclinação de DR_l^1 (Estágio 1) (A^{\min} , A^{\max}); (iii) a variação (Δ) em torno do coeficiente de inclinação ótima (A^{1*}) adotado para a investigação no Estágio 2; (iv) os passos (S^1 , S^2) para o ajuste do coeficiente de inclinação da função tangente hiperbólica em cada estágio.

Os parâmetros relacionados com a variação da inclinação da função de DR (A^{\min} , A^{\max}) e seus passos associados (S^1 , S^2) merecem atenção cuidadosa, pois o ajuste destes parâmetros impactam na qualidade das soluções, de modo que, um número reduzido de inclinações, associado a passos maiores, pode levar a convergência para ótimos locais. Diferentemente, um maior número de inclinações associado a passos reduzidos possibilita uma melhor exploração do espaço de busca, contribuindo assim para introduzir diversidade no procedimento de busca como forma de evitar ótimos locais. Porém, a consideração de passos reduzidos implicam um maior número de simulações da HCDN necessário para resolver o problema, de maneira que, associado com a dimensão do sistema, afeta consideravelmente o tempo computacional.

Em todas as simulações foram adotados para a HCDN, os valores indicados nas equações (3.5) e (3.6). Esses valores são provenientes das melhores soluções obtidas para os sistemas de transmissão testados, associadas ao número reduzido de execuções do algoritmo proposto.

- Estágio 1 - Construção (C):

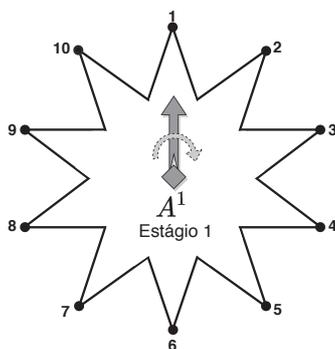
$$DR_l^1 = \frac{e^{x_l/A^1} - 1}{e^{x_l/A^1} + 1} \begin{cases} x_l \in [0,001 : 20] \\ A^1 \in [1 : 1 : 10] \end{cases} \quad (3.5)$$

- Estágio 2 - Refinamento (R):

$$DR_l^2 = \frac{e^{x_l/A^2} - 1}{e^{x_l/A^2} + 1} \begin{cases} x_l \in [0,001 : 20] \\ A^2 \in [A^{1*} - 0,9 : 0,1 : A^{1*} + 0,9] \end{cases} \quad (3.6)$$

Com base nos limites estabelecidos para o Estágio 1, representado pela equação (3.5), a função de DR_l^1 assume valores contínuos para todos os reforços candidatos à expansão de acordo com as variações do coeficiente de inclinação A^1 . A Figura 8 representa todas as possibilidades de valor para A^1 .

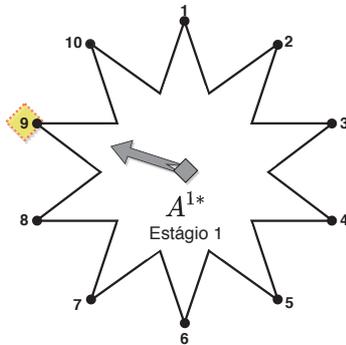
Figura 8 – Possíveis valores para o coeficiente de inclinação (A^1) - Estágio 1.



Fonte: Próprio autor.

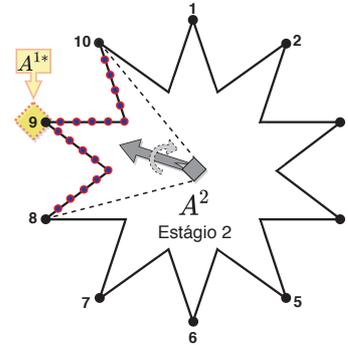
No Estágio 2, conforme a equação (3.6), a função de DR_l^2 realiza a busca na vizinhança da melhor inclinação (A^{1*}) obtida no estágio anterior. Para exemplificar, assumindo que no Estágio 1, a melhor solução para o planejamento da expansão do sistema de transmissão tenha sido obtida para a inclinação correspondente ao valor nove ($A^{1*} = 9$), as Figuras 9 e 10 apresentam as possíveis variações do coeficiente de inclinação para o Estágio 1 e Estágio 2, respectivamente. Para o Estágio 2, nota-se que a variação em torno de A^{1*} resultou no intervalo compreendido pelo valor de 8,1 a 9,9 ($8,1 \leq A^2 \leq 9,9$), de modo a representar o refinamento na busca pela melhor solução.

Figura 9 – Identificação do coeficiente de inclinação (A^{1*}) que possibilitou a melhor solução no Estágio 1.



Fonte: Próprio autor.

Figura 10 – Possíveis valores para o coeficiente de inclinação (A^2) - Estágio 2.



Fonte: Próprio autor.

Conforme evidenciado anteriormente, os valores dos parâmetros da HCDN foram obtidos por meio de uma investigação exaustiva da calibração da metodologia. Portanto, verificou-se que esses valores forneceram resultados adequados e menor esforço computacional em todos os estágios. Com base no passo adotado em cada estágio, tem-se que o número de soluções finais obtidas na metodologia proposta é dez ($C = 10$) e dezenove ($R = 19$) para o Estágio 1 e Estágio 2, respectivamente. Sendo assim, ressalta-se que uma vez definidos os parâmetros de ajuste (S^1 , S^2 , A^{\min} , A^{\max} , Δ , e A^{1*}), o número de execuções para cada estágio é fixo, independentemente do tamanho do sistema em análise. A estratégia proposta mostrou-se capaz de reduzir o número de execuções de problemas de PNL e obter soluções competitivas.

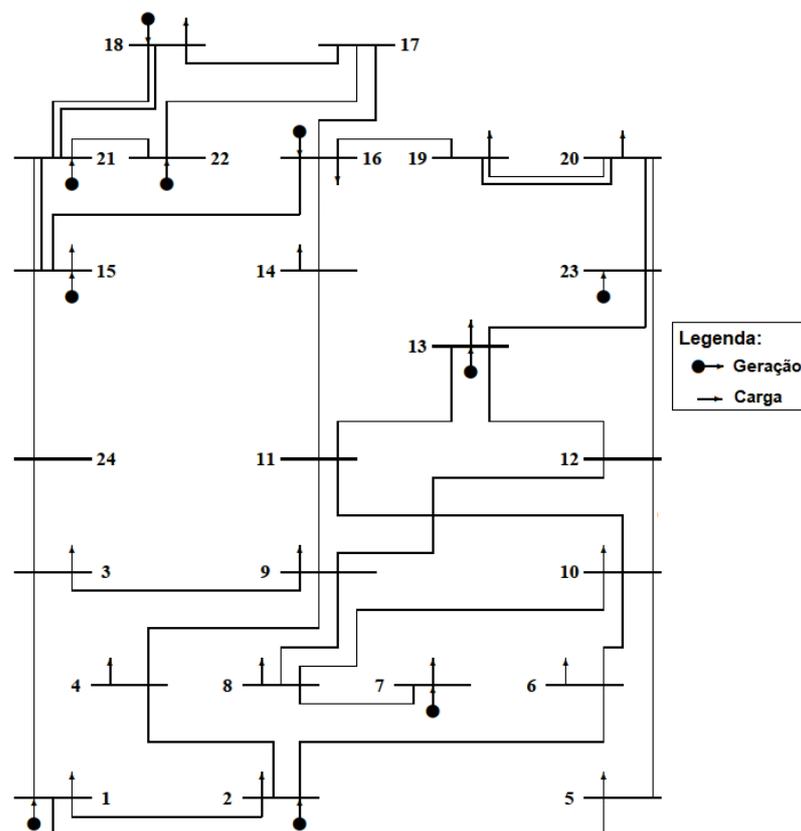
Embora a configuração dos parâmetros da HCDN defina um número fixo de rodadas para cada estágio do algoritmo proposto, o número necessário de PNL a ser resolvido depende do tamanho do sistema em estudo.

3.3 SISTEMA TESTE: IEEE24G4

A fim de exemplificar a aplicação da HCDN, foi escolhido um sistema amplamente difundido na literatura para que cada etapa da metodologia proposta seja detalhadamente analisada e, por fim, validada.

O sistema escolhido consiste no IEEE 24 barras (ROMERO et al., 2002). Este sistema possui 38 circuitos existentes na topologia base, 41 caminhos candidatos e uma demanda prevista de 8.550 MW que deve ser atendida sem realizar o redespacho das unidades geradoras, neste sistema não há consideração de perdas ativas na transmissão de energia elétrica. Embora este sistema apresente originalmente cinco cenários de geração que são identificados por: G0, G1, G2, G3 e G4; a topologia base e os reforços candidatos são iguais para os cenários de geração. O cenário a ser abordado como sistema teste é o cenário G4 (IEEE24G4), os demais cenários são abordados como estudo de caso e estão apresentados no capítulo 4. A Figura 11 mostra a topologia base do referido sistema. Já os dados deste sistema, bem como os dos sistemas utilizados do capítulo 4, estão disponíveis através do link: <<https://github.com/esogit/TNEPdata.git>>.

Figura 11 – Sistema IEEE 24 barras.



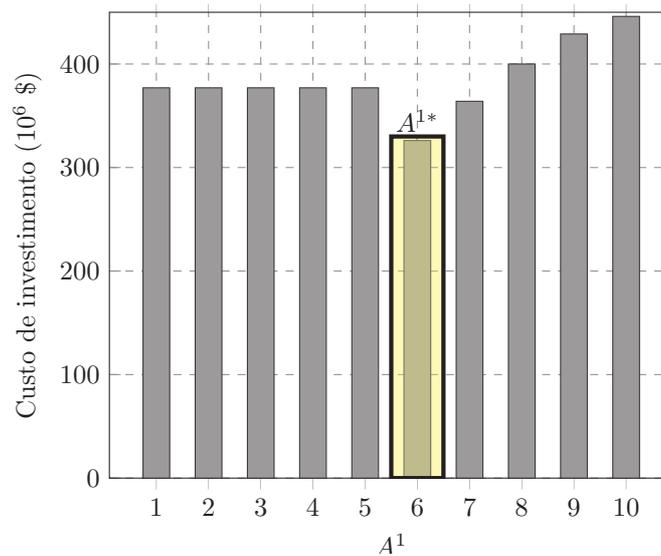
Fonte: Elaboração baseada em Rider Flores (2006).

Com base nos valores apresentados na subseção 3.2.4 para a calibração dos parâmetros de ajuste da HCDN, a seguir, são apresentados os resultados obtidos pela técnica proposta provenientes do estudo do sistema teste, identificando o valor da melhor inclinação em cada estágio através do menor custo de investimento obtido e o número de execução da programação não linear relacionada a cada inclinação investigada.

3.3.1 Fase de construção (Estágio 1): IEEE24G4

Neste estágio, são avaliadas dez inclinações distintas ($C = 10$) da metodologia proposta que estão associadas à função de DR_l^1 , a fim de auxiliar no processo de tomada de decisão. Nesta investigação, foi possível obter o menor custo de investimento que propicia a expansão do sistema de transmissão em estudo. Conforme a Figura 12, neste estágio, o menor custo corresponde à inclinação igual a 6 ($A^{1*} = 6$).

Figura 12 – Custo de investimento relacionado às inclinações (A^1) - Estágio 1.



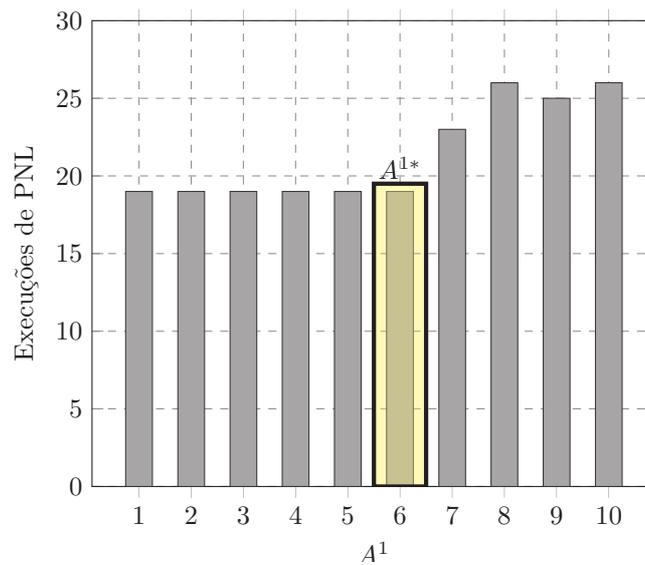
Fonte: Próprio autor.

Com o propósito de avaliar o desempenho da HCDN, na Figura 13 são apresentados os valores do coeficiente de ajuste da inclinação da função de DR_l^1 e

o número de execuções de programação não linear HCDN que são necessárias para resolver o problema. Dessa forma, a avaliação de desempenho não fica vinculada ao tipo de processador utilizado, que é o que acontece quando adota-se o tempo computacional, por exemplo, como parâmetro para a análise de desempenho de uma técnica.

A partir da análise da Figura 13, nota-se que o menor número de execuções de PNL também foi obtido para a melhor inclinação determinada (A^{1*}). Ao identificar a melhor inclinação deste estágio, é obtido o plano de expansão correspondente a este parâmetro, cujos circuitos necessários para reforçar a topologia base do sistema associado ao custo de investimento, expresso em milhões de dólares que está denotado por M\$, está apresentado através da Tabela 2, indicando o caminho selecionado e o respectivo quantitativo de circuitos que devem ser construídos.

Figura 13 – Número de execuções de PNL relacionado às inclinações (A^1) - Estágio 1.



Fonte: Próprio autor.

Tabela 2 – Planejamento da expansão do sistema de transmissão IEEE24G4 sem redesenho obtido pela HCDN - Estágio 1.

IEEE24G4 - Estágio 1			
Caminho selecionado	Número de circuito	Caminho selecionado	Número de circuito
03-24	1	15-24	1
06-10	1	16-17	1
07-08	3	14-16	1
10-12	1	Custo total:	M\$ 326

Fonte: Próprio autor

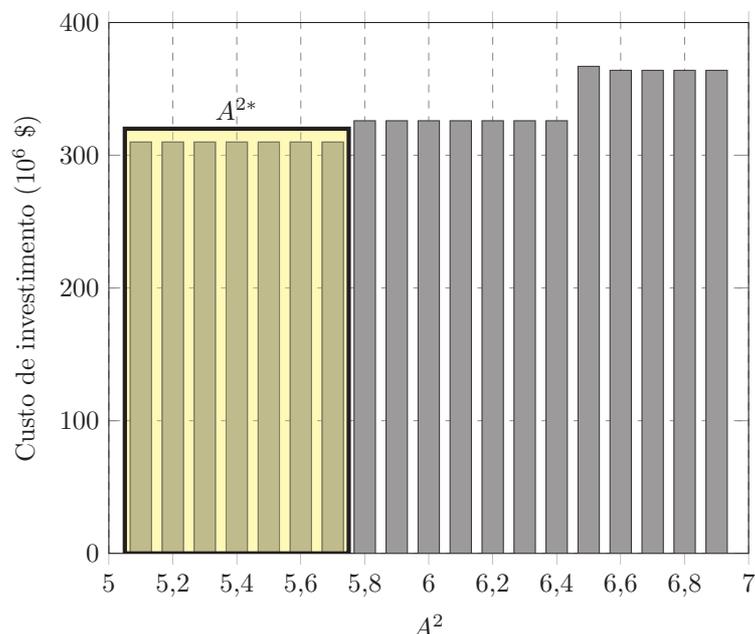
Com a identificação da melhor inclinação associada à DR_l^1 , é então realizada a busca local em torno de A^{1*} , que caracteriza o Estágio 2.

3.3.2 Fase de refinamento (Estágio 2): IEEE24G4

Após finalizar a fase de construção, inicia-se a fase de verificação ou refinamento de plano de expansão obtido até então. Portanto, a partir dos limites estabelecidos na calibração da HCDN para o Estágio 2, de acordo com a equação (3.6), este estágio tem como objetivo realizar a investigação das possibilidades de obtenção de um planejamento mais econômico, através de uma pequena variação do coeficiente de inclinação ótima do Estágio 1 (A^{1*}).

De acordo com o passo de variação da inclinação adotado neste estágio, são realizadas dezenove ($R = 19$) simulações da heurística construtiva proposta. Esta busca permitiu encontrar um custo de investimento mais econômico que o obtido no estágio anterior. Dessa forma, como o valor de $A^{1*} = 6$, o intervalo a ser investigado corresponde aos valores de 5,1 a 6,9, cuja variação é discretizada pelo valor do passo $S^2 = 0,1$. A Figura 14 mostra o custo de investimento vinculado a cada valor do A^2 e destaca o menor valor de investimento.

Figura 14 – Custo de investimento relacionado às inclinações (A^2) - Estágio 2.



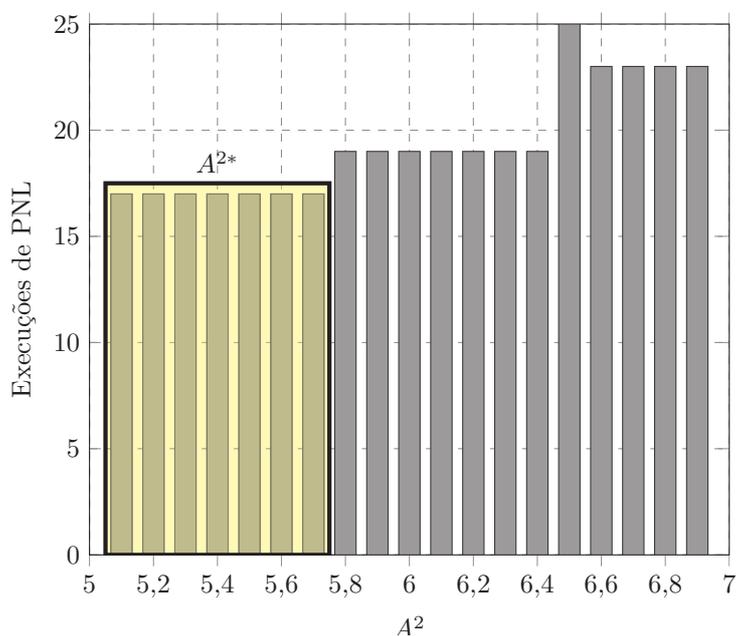
Fonte: Próprio autor.

Neste estágio o desempenho computacional da técnica também é avaliado, de modo que para os valores de inclinação da função de DR_l^2 o número de problemas de programação não linear resolvidos estão apresentados na Figura 15, cujo intervalo que resultou no menor custo de investimento neste estágio está destacado.

A partir da Figura 14, é identificado que a inclinação que corresponde ao intervalo de 5,1 a 5,7 resulta no mesmo custo de investimento, sendo o menor dentre as inclinações avaliadas. Desta forma, o custo para este intervalo representa a melhor solução de HCDN para o sistema em estudo. O plano de expansão que resulta no custo de investimento obtido está apresentado na Tabela 3.

A Figura 15 mostra que a variação da inclinação A^2 dentro do intervalo de 5,1 a 5,7 resultou na mesma quantidade de execuções de PNL e que corresponde ao menor custo de investimento para expansão do sistema em estudo.

Figura 15 – Número de execuções de PNL relacionado às inclinações (A^2) - Estágio 2.



Fonte: Próprio autor.

Tabela 3 – Planejamento da expansão do sistema de transmissão IEEE 24 barras cenário G4 sem redespacho obtido pela HCDN.

IEEE24G4 - Estágio 2			
Caminho selecionado	Número de circuito	Caminho selecionado	Número de circuito
03-24	1	15-24	1
06-10	1	16-17	2
07-08	2	14-16	1
10-12	1	Custo total:	M\$ 310

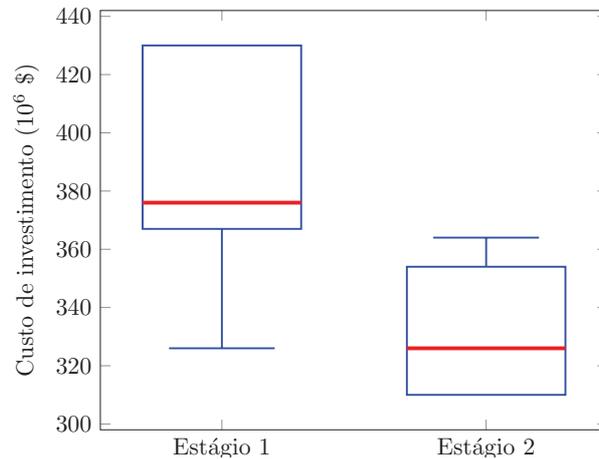
Fonte: Próprio autor.

3.3.3 Análise da HCDN: IEEE24G4

A partir das investigações apresentadas nos dois estágios, percebe-se que no Estágio 2, houve uma melhora do custo de investimento obtido no Estágio 1, devido ao refinamento da solução, demonstrando que a técnica propiciou o efeito desejado

aprimorando a melhor solução até então. A dispersão do custo de investimento em cada estágio, devido à variação do coeficiente de inclinação (A), é apresentada na Figura 16.

Figura 16 – Dispersão do custo de investimento em cada estágio da HCDN.



Fonte: Próprio autor.

A análise estatística descritiva em relação aos custos de investimentos obtidos na fase de construção (Estágio 1) e na fase de refinamento (Estágio 2) permite observar que no Estágio 2, há uma menor amplitude interquartílica acompanhada da menor dispersão dos resultados quando comparados com os custos de investimento obtidos no Estágio 1. Esta característica é notada porque no Estágio 2 foi possível obter, com sucesso, um refinamento em torno da melhor solução obtida e, conseqüentemente, uma melhoria na média das soluções.

Diante do resultado obtido pela HCDN para o sistema teste IEEE24G4, a Tabela 4 apresenta o custo de investimento ótimo difundido na literatura para o sistema em questão e os resultados obtidos pela metodologia proposta, contendo as seguintes informações: (i) o valor referente ao custo de investimento total de expansão; (ii) o número total de execuções de problema de PNL (Estágio 1 e Estágio 2); (iii) a inclinação da função de DR_l^1 que gerou a melhor solução da fase de construção (A^{1*}); (iv) a inclinação da função DR_l^2 que gerou a melhor solução da fase de verificação (A^{2*}); (v) a diferença percentual entre a solução obtida pela metodologia proposta e a melhor solução divulgada na literatura até então.

Tabela 4 – Comparação do desempenho da HCDN com resultado da literatura especializada - IEEE24G4 sem redespacho.

Custo ótimo da literatura	Heurística construtiva proposta				
	Custo ótimo da HCDN	PNL	A^{1*}	A^{2*}	Variação do custo (%)
M\$ 342 (FREITAS et al., 2019)	M\$ 310	583	6	5,1-5,7	-9,3%

Fonte: Próprio autor.

Conforme apresentado na Tabela 4, conclui-se que a HCDN encontrou solução melhor do que a registrada na literatura, obtendo a redução de 9,3% no custo de investimento da expansão do sistema IEEE24G4. Portanto, assegurada pelo seu desempenho, a metodologia proposta mostrou-se eficiente na obtenção do plano de expansão para o sistema de transmissão aqui estudado.

3.4 CONSIDERAÇÕES PARCIAIS

Em resumo, a HCDN resolve o problema do PET em dois estágios. No primeiro estágio, é realizada a busca pela melhor solução via análise de dez valores de inclinações distintas (A^1) para a função que modela decisão do reforço a ser implementado, de acordo com as equações (3.1), (3.2) e (3.3). No término do Estágio 1 é determinado a inclinação que resulta no melhor planejamento para expansão do sistema de transmissão de energia elétrica (A^{1*}). Na sequência, é executado o Estágio 2, que se caracteriza pela aplicação da busca local na vizinhança da atual melhor solução do estágio anterior. Esta busca é definida pela investigação de dezenove valores diferentes de inclinações (A^2) em torno da inclinação ótima obtida no Estágio 1 (A^{1*}), esta investigação ocorre com base nas equações (3.4), (3.2) e (3.3).

Com a finalidade de validar a Heurística Construtiva em Dois Níveis proposta, foi estudado um sistema teste, IEEE24G4, que teve sua solução apresentada em cada estágio da HCDN, cujo desempenho se mostrou satisfatório e resultou em uma solução melhor do que a apresentada na literatura especializada. Portanto, a fim de corroborar com a validação da técnica proposta, no capítulo a seguir são

apresentados os estudos de outros sistemas difundidos na literatura considerando para alguns casos, inclusive, perdas ativas no processo de transmissão de energia elétrica.

4 VALIDAÇÃO DA TÉCNICA PROPOSTA: ESTUDO DE CASOS

Com o propósito de investigar o desempenho da Heurística Construtiva em Dois Níveis na resolução do PET, considerando as especificidades do planejamento da expansão de sistemas de transmissão, foram selecionados alguns dos principais casos da literatura especializada a fim de contemplar sistemas de grande porte, com a possibilidade de adoção, em alguns casos, do redespacho das unidades geradoras e das perdas ativas na transmissão de energia. Portanto, neste capítulo, são apresentados os sistemas de transmissão a serem estudados, com base na formulação do problema do PET apresentada no Capítulo 2, bem como os resultados e análises obtidos pela metodologia proposta.

4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Devido às alternativas de investimento da expansão de sistemas de transmissão, o problema do PET torna-se de difícil resolução em virtude da explosão combinatória, de modo que esta característica se intensifica de acordo com a dimensão do sistema de transmissão. Outro fator que contribui para a dificuldade da resolução é a não conectividade apresentada na topologia base do sistema. Quando estas características associam-se à modelagem não linear do problema, a complexidade para a sua resolução amplifica, pois o sistema passa a apresentar uma estrutura multimodal, que leva a convergência da maioria dos métodos aproximados para solução ótima local, em consequência do número elevado de pontos ótimos locais.

Diante dos aspectos do problema PET apresentados anteriormente, o estudo por técnicas heurísticas que são capazes de solucionar o problema identificando um plano de expansão, que viabiliza o atendimento às restrições impostas a um custo de investimento mínimo, é objeto de pesquisas que perfazem décadas. Dessa forma, a avaliação do desempenho de uma determinada técnica é através da análise dos resultados obtidos diante da sua aplicação a sistemas distintos.

Objetivando avaliar a qualidade e o desempenho da heurística construtiva proposta, serão analisados os planos de expansão de sistemas de transmissão obtidos para casos de estudo, tendo a possibilidade de considerar o redespacho dos geradores

e as perdas ativas no planejamento. Embora a formulação proposta contemple o efeito das perdas ativas no sistema de transmissão, na literatura especializada há um número reduzido de modelos que o considera para fins de planejamento da expansão de sistemas de transmissão. Sendo assim, para que a avaliação possa abranger maior quantidade de comparações das soluções obtidas, foram selecionados sistemas e estes separados em dois grupos, cujo critério da divisão consiste na consideração das perdas ativas na transmissão de energia elétrica.

Grupo 1: Desprezando o efeito das perdas ativas da transmissão:

- Sistema IEEE 24 barras sem redespacho de geração (considerando os outros quatro cenários de geração (G0-G3));
- Sistema Sul Brasileiro com e sem redespacho de geração;
- Sistema Colombiano sem redespacho.

Grupo 2: Considerando o efeito das perdas ativas da transmissão:

- Sistema Garver com redespacho de geração;
- Sistema IEEE 24 barras (considerando o cenário de geração G0);
- Sistema Sul Brasileiro com redespacho de geração.

A implementação da técnica proposta foi realizada na linguagem MATLAB[®] e teve as simulações desenvolvidas em um computador pessoal, com um processador de 2,93GHz Intel[®] Core[™] i7 e 8GB de RAM.

Os dados destes sistemas estão disponíveis através do seguinte link: <<https://github.com/esogit/TNEPdata.git>>. A seguir, são apresentados os estudos realizados em cada um dos sistemas, cuja solução obtida através da HCDN é analisada e comparada com os resultados encontrados na literatura especializada. Para todos os casos estudados, os planos de expansão obtidos pela HCDN apresentaram corte de carga inferior a 1MW, valor este normalmente adotado como tolerância na literatura. Serão apresentados, apenas, os planos em que a metodologia proposta encontrou um custo de investimento menor ou igual ao divulgado na literatura especializada.

4.2 DESPREZANDO O EFEITO DAS PERDAS ATIVAS DA TRANSMISSÃO

Os sistemas que compõem os casos de estudo e que estão apresentados nesta seção, tiveram o plano de expansão do sistema de transmissão determinado sem considerar as perdas ativas ao longo do planejamento.

4.2.1 Sistema IEEE 24 barras

Este sistema foi apresentado na seção 3.3 do capítulo 3, em que foram relatadas as suas características topológicas, indicando as estruturas existentes, bem como os caminhos (reforços) candidatos à expansão. Porém, devido à seção 3.3 ilustrar de forma mais detalhada o desempenho da técnica proposta, foi abordado, no capítulo anterior, o cenário G4.

Por ser um sistema amplamente utilizado na literatura para avaliar o desempenho de novas metodologias (ROMERO et al., 2002), neste capítulo são considerados os demais cenários de geração deste sistema. Em todos os cenários a serem apresentados, não há redespacho das unidades geradoras, a demanda para cada um dos cenários propostos é igual a 8.550 MW e, por fim, a diferença entre os cenários de avaliação consiste na potência gerada pelas unidades geradoras nas barras do sistema.

Os planos de expansão obtidos pela metodologia proposta para os cenários do sistema IEEE 24 barras foram determinados a partir da definição do coeficiente de inclinação da função de decisão de reforço em cada estágio da técnica, cuja investigação resolveu inúmeros problemas do PET que, de acordo com a modelagem adotada, utilizou da programação não linear baseada na metodologia primal dual de pontos interiores. Portanto, os resultados da HCDN para o plano de expansão em cada cenário do sistema estão apresentados na Tabela 5, que resume as seguintes informações: *(i)* o valor referente ao custo total de expansão obtido, expresso em milhões de dólares e que está denotado por M ; *(ii)* o número total de execuções de problema de programação não linear, associado aos Estágios 1 e 2, que é apresentado como parâmetro para avaliação do desempenho da técnica proposta; *(iii)* a inclinação (A^{1*}) da função de decisão de reforço que gerou a melhor solução na fase de construção (Estágio 1); *(iv)* a inclinação (A^{2*}) da função de decisão de

reforço que gerou a melhor solução na fase de refinamento (Estágio 2).

Tabela 5 – Custo de investimento obtido pela HCDN e seus parâmetros otimizados para o sistema de transmissão IEEE 24 barras sem redesenho.

IEEE 24 barras - cenário de geração G0 (IEEE24G0)				
Sistemas de transmissão	Custo ótimo HCDN	PNL	A^{1*}	A^{2*}
IEEE24G0	M\$ 152	382	1	0,1-0,3
IEEE 24 barras - cenário de geração G1 (IEEE24G1)				
Sistemas de transmissão	Custo ótimo HCDN	PNL	A^{1*}	A^{2*}
IEEE24G1	M\$ 370	720	1	0,2
IEEE 24 barras - cenário de geração G2 (IEEE24G2)				
Sistemas de transmissão	Custo ótimo HCDN	PNL	A^{1*}	A^{2*}
IEEE24G2	M\$ 392	735	2	2
IEEE 24 barras - cenário de geração G3 (IEEE24G3)				
Sistemas de transmissão	Custo ótimo HCDN	PNL	A^{1*}	A^{2*}
IEEE24G3	M\$ 218	837	1	1
IEEE 24 barras - cenário de geração G4 (IEEE24G4)				
Sistemas de transmissão	Custo ótimo HCDN	PNL	A^{1*}	A^{2*}
IEEE24G4	M\$ 310	583	6	5,1-5,7

Fonte: Próprio autor.

Considerando todos os cenários de geração do sistema IEEE24, a critério de comparação, na Tabela 6 são apresentados os custos de investimento obtidos pela HCDN, relacionados ao plano de expansão do sistema de transmissão, associado a cada cenário de geração, e os resultados relacionados aos custos de investimento dos planos de expansão ótimos difundidos na literatura (OLIVEIRA et al., 2018; FREITAS et al., 2019), inclusive para o cenário abordado no caso tutorial (seção 3.3), indicado em milhões de dólares. A fim de auxiliar a análise do desempenho da

HCDN, também é apresentada na Tabela 6 a diferença percentual entre a solução obtida pela metodologia proposta e a melhor solução divulgada na literatura até o momento. O custo de investimento (custo ótimo) foi destacado nos casos em que a HCDN teve melhor desempenho.

Tabela 6 – Comparação dos resultados obtidos pela HCDN para o sistema IEEE 24 barras.

Sistemas de transmissão	Custo ótimo da literatura	Custo ótimo da HCDN	Variação do custo (%)
IEEE24G0	M\$ 152 (OLIVEIRA et al., 2018)	M\$ 152	0
IEEE24G1	M\$ 390 (FREITAS et al., 2019)	M\$ 370	-5,1%
IEEE24G2	M\$ 392 (FREITAS et al., 2019)	M\$ 392	0
IEEE24G3	M\$ 218 (FREITAS et al., 2019)	M\$ 218	0
IEEE24G4	M\$ 342 (FREITAS et al., 2019)	M\$ 310	-9,3%

Fonte: Próprio autor.

Analisando os custos de investimento obtidos pela HCDN, destaca-se o desempenho da técnica proposta pela qualidade das soluções, sendo iguais ou mais econômicas do que as soluções registradas na literatura. Para os sistemas IEEE24G1 e IEEE24G4, a heurística proposta encontrou um plano de expansão do sistema de transmissão mais econômico do que o divulgado na literatura especializada, reduzindo o custo de investimento para cada um dos cenários em 5,1% e 9,3%, respectivamente. Os demais cenários do sistema IEEE 24 barras foram resolvidos de forma satisfatória e tiveram o planos de expansão e o custos de investimentos iguais aos da literatura, como é mostrado na Tabela 6.

A HCDN aplicada ao sistema IEEE 24 barras, em todos os cenários apresentados, propiciou a determinação do plano de expansão que atende à demanda e aos demais requisitos estabelecidos, apresentando corte de carga inferior a 1MW, proporcionando o mínimo custo de investimento. Com o propósito de identificar os

circuitos (reforços) que devem ser implementados, a Tabela 7 apresenta o planejamento associado a cada cenário de geração do sistema, identificando o caminho selecionado para a construção de circuito, a quantidade necessária de circuitos que devem ser construídos em cada caminho específico e o custo total do plano da expansão.

Tabela 7 – Planejamento da expansão do sistema de transmissão IEEE 24 barras sem redespacho obtido pela HCDN.

IEEE 24 barras - cenário de geração G0 (IEEE24G0)			
Caminho selecionado	Número de circuito	Caminho selecionado	Número de circuito
06-10	2	14-16	2
07-08	2	-	-
10-12	1	Custo total:	M\$ 152

IEEE 24 barras - cenário de geração G1 (IEEE24G1)			
Caminho selecionado	Número de circuito	Caminho selecionado	Número de circuito
01-05	1	15-24	1
03-24	1	16-17	2
06-10	1	16-19	1
07-08	2	17-18	1
14-16	1	Custo total:	M\$ 370

IEEE 24 barras - cenário de geração G2 (IEEE24G2)			
Caminho selecionado	Número de circuito	Caminho selecionado	Número de circuito
01-05	1	14-16	1
03-24	1	15-24	1
06-10	1	16-17	2
07-08	1	17-18	2
10-12	1	Custo total:	M\$ 392

Continua

Fonte: Próprio autor.

Tabela 7 - Planejamento da expansão do sistema de transmissão IEEE 24 barras sem redespacho obtido pela HCDN.

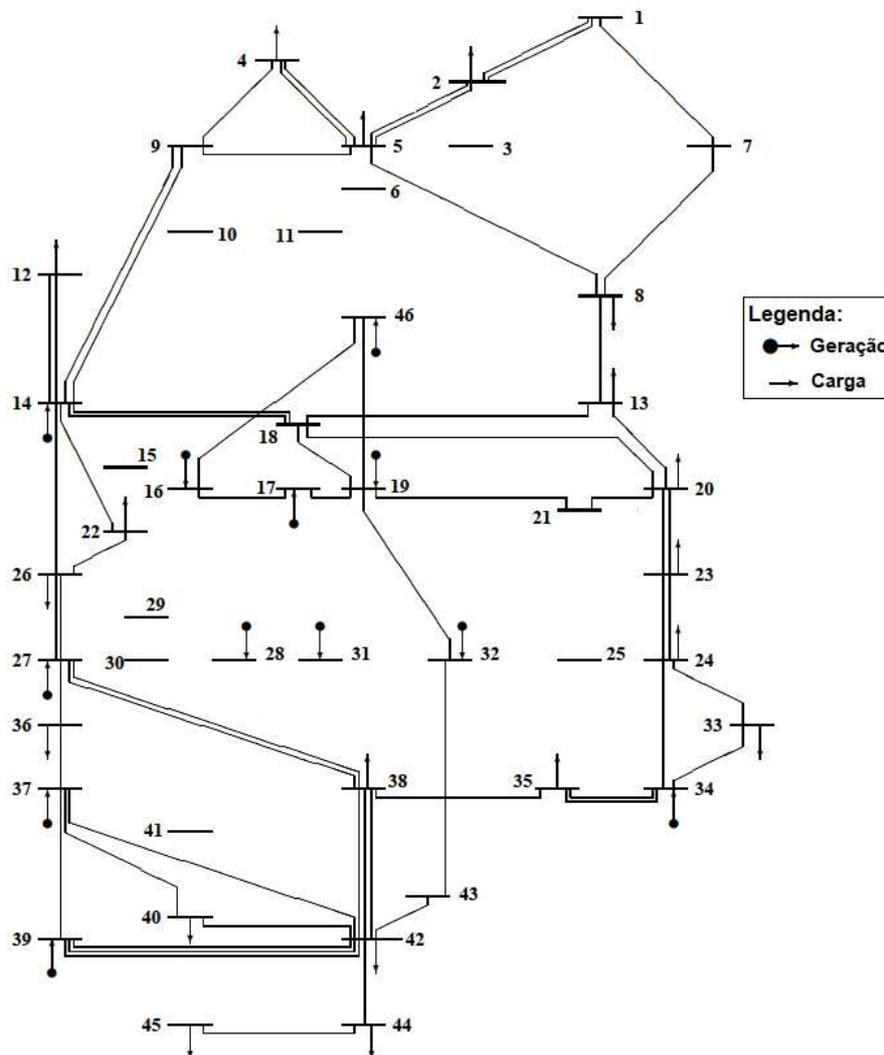
Continuação			
IEEE 24 barras - cenário de geração G3 (IEEE24G3)			
Caminho selecionado	Número de circuito	Caminho selecionado	Número de circuito
06-10	1	16-17	1
07-08	2	20-23	1
10-12	1	-	-
14-16	1	Custo total:	M\$ 218
IEEE 24 barras - cenário de geração G4 (IEEE24G4)			
Caminho selecionado	Número de circuito	Caminho selecionado	Número de circuito
03-24	1	15-24	1
06-10	1	16-17	2
07-08	2	14-16	1
10-12	1	Custo total:	M\$ 310

Fonte: Próprio autor.

4.2.2 Sistema Sul Brasileiro

A fim de avaliar a técnica para um sistema real, um dos escolhidos foi o sistema equivalente à região sul do Brasil, denominado sistema Sul Brasileiro, proposto por Monticelli et al. (1982). O sistema Sul Brasileiro é composto por 46 barras, das quais 11 barras estão isoladas, 66 circuitos existentes na topologia base, conforme o diagrama unifilar equivalente que está representado na Figura 17, 79 caminhos (reforços) candidatos e uma demanda prevista de 6.880 MW. A intensificação de seu uso para validação de novas metodologias a serem aplicadas no problema do planejamento da expansão de sistemas de transmissão de energia elétrica ressalta sua importância na pesquisa e por este motivo, o referido sistema também foi selecionado para avaliação da HCDN.

Figura 17 – Sistema equivalente do Sul Brasileiro.



Fonte: Elaboração baseada em Rider Flores (2006).

Como o sistema Sul Brasileiro apresenta a possibilidade de considerar o redespacho das unidades geradoras, a análise deste sistema é dividida em duas, sendo: (i) na primeira análise, é apresentado o planejamento econômico obtido para o sistema com as gerações pré-definidas, de modo a não permitir o redespacho (SUL-SR); (ii) na segunda análise, é permitida uma reprogramação das unidades geradoras do sistema, possibilitando a realização do redespacho ao longo da expansão

do sistema de transmissão (SUL-CR).

Em síntese deste estudo, a Tabela 8 reúne as informações relacionadas ao custo de investimento determinado pela HCDN, aos parâmetros da função de decisão de reforço em cada estágio e a métrica de análise do desempenho da HCDN que está relacionada ao número total de execuções de PNL, não havendo a necessidade da utilização do tempo computacional para avaliação do desempenho, já que este parâmetro está vinculado à característica do processador do computador pessoal utilizado.

Tabela 8 – Custo de investimento obtido pela HCDN e seus parâmetros otimizados para o sistema de transmissão Sul Brasileiro.

Sistema Sul Brasileiro sem redespacho (SUL-SR)				
Sistemas de transmissão	Custo ótimo HCDN	PNL	A^{1*}	A^{2*}
SUL-SR	M\$ 154,420	1075	3	3
Sistema Sul Brasileiro com redespacho (SUL-CR)				
Sistemas de transmissão	Custo ótimo HCDN	PNL	A^{1*}	A^{2*}
SUL-CR	M\$ 70,289	373	1	1

Fonte: Próprio autor.

O valor do coeficiente de inclinação obtido na fase de refinamento (A^{2*}) implica o plano de expansão para o sistema de transmissão. A qualidade deste plano é analisada através da comparação com o encontrado na literatura. Esta comparação é realizada através do custo de investimento associado ao plano de expansão, que é utilizado como métrica de avaliação e que está apresentado na Tabela 9.

Tabela 9 – Comparação do custo de investimento obtido da HCDN para o Sistema Sul Brasileiro.

Sistemas de transmissão	Custo ótimo da literatura	Custo ótimo da HCDN	Variação do custo (%)
SUL-CR	M\$ 70,289 (OLIVEIRA et al., 2018)	M\$ 70,289	0
SUL-SR	M\$ 154,420 (MENDONÇA et al., 2016)	M\$ 154,420	0

Fonte: Próprio autor.

A Tabela 10 expõe uma comparação do número de problemas de programação não linear executados pela metodologia proposta e os divulgados na literatura através de otimização não linear inteira clássica (RIDER et al., 2008).

Tabela 10 – Comparação relacionada ao número de execuções de PNLs para o Sistema Sul Brasileiro.

Sistemas de transmissão	Metodologia proposta	Literatura (<i>Branch-and-Bound</i>)
SUL-CR	M\$ 70,289 373 PNL	M\$ 70,289 379 PNL
SUL-SR	M\$ 154,420 1.075 PNL	M\$ 154,420 8.081 PNL

Fonte: Próprio autor.

A partir dos resultados apresentados na Tabela 9, percebe-se que a heurística proposta teve um desempenho satisfatório em relação à qualidade das soluções, obtendo os mesmos custos de investimentos do que os divulgados na literatura. Porém, ao fazer um paralelo com o esforço computacional, Tabela 10, nota-se que a estratégia heurística proposta foi capaz de conciliar a obtenção do plano de expansão de boa qualidade com baixo esforço computacional.

Os planos de expansão do sistema Sul Brasileiro, com e sem redespacho, obtidos pela HCDN estão apresentados na Tabela 11 com a identificação da quantidade de circuitos a serem construídos e do caminho selecionado para realizar a adição do circuito.

Tabela 11 – Planejamento da expansão do sistema de transmissão Sul Brasileiro obtido pela HCDN.

Sistema Sul Brasileiro sem redespacho (SUL-SR)			
Caminho selecionado	Número de circuito	Caminho selecionado	Número de circuito
05-06	2	29-30	2
19-25	1	31-32	1
20-21	1	32-43	1
24-25	2	42-43	2
26-29	3	46-06	1
28-30	1	Custo total:	M\$ 154,420

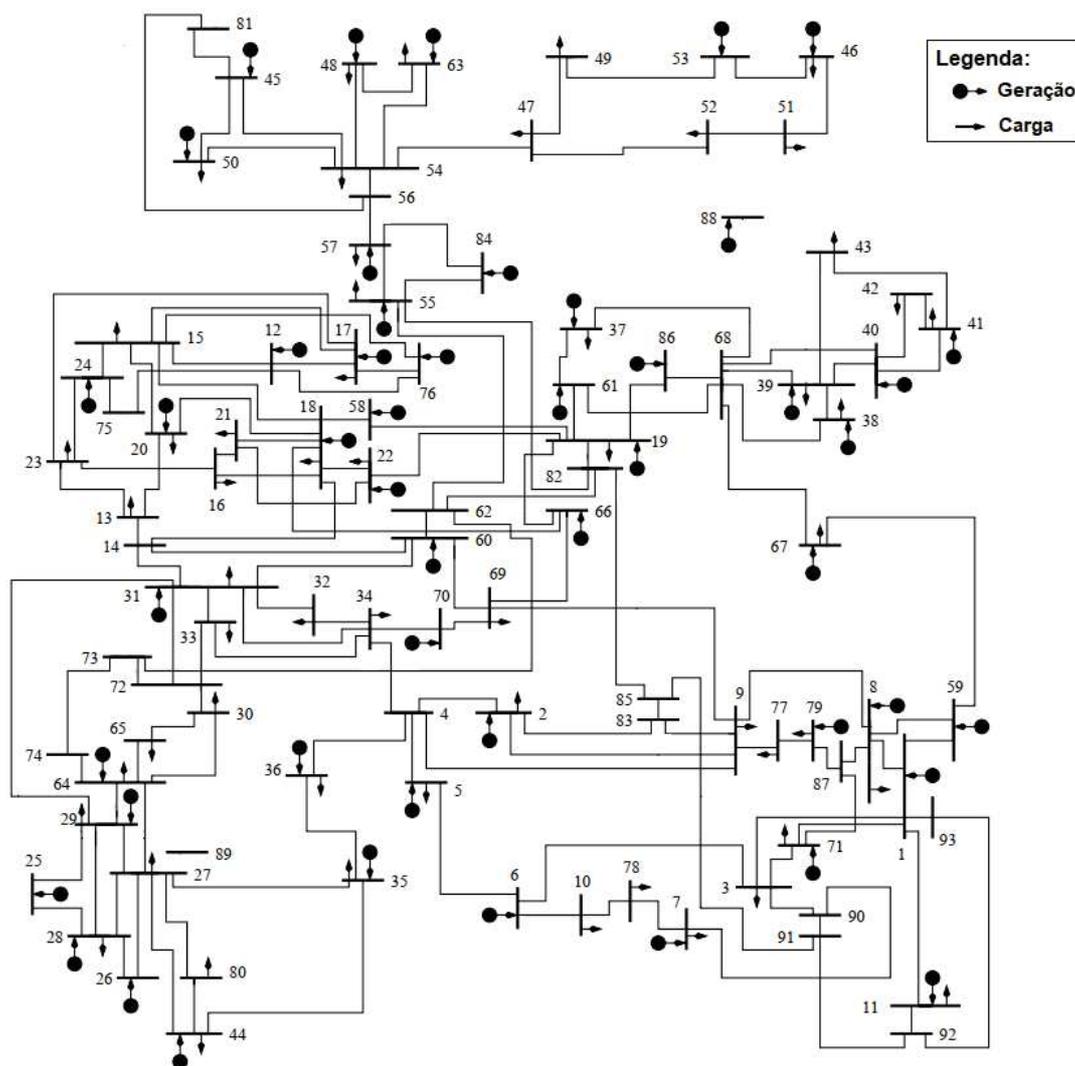
Sistema Sul Brasileiro com redespacho (SUL-CR)			
Caminho selecionado	Número de circuito	Caminho selecionado	Número de circuito
05-06	2	42-43	1
13-20	1	46-06	1
20-21	2	-	-
20-23	1	Custo total:	M\$ 70,289

Fonte: Próprio autor.

4.2.3 Sistema Colombiano

O sistema colombiano consiste em outro sistema real que tem sido utilizado para análise de desempenho de novas metodologias aplicadas ao problema do planejamento da expansão de sistemas de transmissão. A Figura 18 representa a topologia base deste sistema que é constituído por 93 barras, 193 circuitos existentes na topologia base, 155 rotas candidatas à expansão, que devido à opção de não construir o circuito ou de ser possível construir até três circuitos no mesmo caminho, implica o valor de 4^{155} possibilidades de investimento para o planejamento da expansão do referido sistema.

Figura 18 – Sistema Colombiano.



Fonte: Elaboração baseada em Rider Flores (2006).

Para o sistema Colombiano, é possível realizar três análises distintas, devido aos três cenários de geração que são especificados em conformidade com sua demanda, embora não seja permitido o redespacho da geração em nenhum dos cenários. De acordo com a demanda prevista para os cenários deste sistema, estes passam a ser identificados como:

- Cenário P1: demanda prevista de 9.750MW (COL-P1);

- Cenário P2: demanda prevista de 12.162MW (COL-P2);
- Cenário P3: demanda prevista de 14.559MW (COL-P3).

A Tabela 12 apresenta o custo de investimento e os parâmetros otimizados da heurística proposta referente ao plano de expansão, de todos os cenários deste sistema, bem como o número total de PNL executados.

Tabela 12 – Custo de investimento obtido pela HCDN e seus parâmetros otimizados para o sistema de transmissão Colombiano.

Sistema Colombiano - cenário P1 (COL-P1)				
Sistemas de transmissão	Custo ótimo HCDN	PNL	A ^{1*}	A ^{2*}
COL-P1	M\$ 286,364	362	6	5,1-5,7

Sistema Colombiano - cenário P2 (COL-P2)				
Sistemas de transmissão	Custo ótimo HCDN	PNL	A ^{1*}	A ^{2*}
COL-P2	M\$ 443,494	669	2	1,2-1,8

Sistema Colombiano - cenário P3 (COL-P3)				
Sistemas de transmissão	Custo ótimo HCDN	PNL	A ^{1*}	A ^{2*}
COL-P3	M\$ 647,889	887	2	2,2

Fonte: Próprio autor.

Associado a cada um dos cenários deste sistema, a Tabela 13 mostra os custos de investimento encontrados na literatura e os obtidos pela HCDN, bem como o percentual de variação do custo obtido em relação ao difundido na literatura. O custo de investimento (custo ótimo) foi destacado para os casos em que a HCDN teve melhor desempenho.

Tabela 13 – Comparação do custo de investimento obtido da HCDN para o Sistema Colombiano.

Sistemas de transmissão	Custo ótimo da literatura	Custo ótimo da HCDN	Variação do custo (%)
COL-P1	M\$ 296,454 (Rider Flores, 2006)	M\$ 286,364	-3,5%
COL-P2	M\$ 443,494 (MENDONÇA et al., 2016)	M\$ 443,494	0
COL-P3	M\$ 560,002 (GALLEGO et al., 2017)	M\$ 647,889	+15,5%

Fonte: Próprio autor.

Diante dos resultados apresentados na Tabela 13, pode se evidenciar que custo de investimento que define a expansão do sistema COL-P1 é mais econômico do que o difundido na literatura. Esta economia de investimento refere-se a uma redução de 3,5% do menor custo conhecido até o momento. Entretanto, para o sistema COL-P3, não foi possível obter a solução ótima divulgada na literatura, sendo o resultado pior do que o da literatura, com um aumento de 15,5% no custo. Destaca-se, porém, que isto pode ocorrer através da utilização de técnicas e algoritmos heurísticos, devido à não garantia de otimalidade global através dos mesmos. No entanto, a metodologia proposta demonstrou vantagens para a maioria dos casos testados, conforme apresentado neste capítulo.

Com base na otimização não linear inteira clássica (RIDER et al., 2008), o número de PNL executadas pode ser utilizado como critério comparativo para a heurística proposta, conforme apresentado na Tabela 14.

Tabela 14 – Comparação relacionada ao número de execuções de PNLs para o Sistema Colombiano.

Sistemas de Transmissão	Metodologia proposta	Literatura (<i>Branch-and-Bound</i>)
COL-P3	M\$ 647,889 887 PNL	M\$ 560,002 40.797 PNL

Fonte: Próprio autor.

Embora o custo de investimento obtido para o COL-P3 seja superior ao difundido na literatura, é observado que houve um número elevado de execuções de PNL pela técnica *Branch-and-Bound* para determinação do plano de expansão, mostrando que a solução determinada pela HCDN consiste em um ótimo local de boa qualidade, ou, em outras palavras, com boa relação de compromisso entre qualidade e esforço computacional.

A Tabela 15 apresenta os detalhes do plano de expansão obtido pela HCDN para os cenários COL-P1, com um custo mais econômico em relação à literatura, e COL-P2, cujo plano é idêntico ao da literatura especializada.

Tabela 15 – Planejamento da expansão do sistema de transmissão Colombiano sem redespacho obtido pela HCDN.

Sistema Colombiano - cenário P1 (COL-P1)			
Caminho selecionado	Número de circuito	Caminho selecionado	Número de circuito
45-81	1	57-81	1
55-57	1	82-85	1
55-82	1	Custo total:	M\$ 286,364

Sistema Colombiano - cenário P2 (COL-P2)			
Caminho selecionado	Número de circuito	Caminho selecionado	Número de circuito
19-82	1	57-81	2
27-29	1	62-73	1
45-81	1	64-74	1
55-57	1	82-85	1
55-62	1	Custo total:	M\$ 443,494

Fonte: Próprio autor.

4.3 CONSIDERANDO O EFEITO DAS PERDAS ATIVAS DA TRANSMISSÃO

Nesta seção, são apresentados três sistemas cujo planejamento da expansão considera o efeito das perdas ativas na transmissão. Estes sistemas foram escolhidos com base nos resultados obtidos na literatura e consistem em: (i) sistema Garver com redespacho (GARVER-CR); (ii) sistema IEEE24G0; (iii) sistema Sul Brasileiro

com redespacho (SUL-CR). A característica do sistema em considerar o redespacho da geração consiste em uma reprogramação/adequação da geração a fim de otimizar e garantir as condições operacionais do sistema. Portanto, os sistemas GARVER-CR e SUL-CR são utilizados para analisar a influência do redespacho da geração no planejamento da expansão do sistema de transmissão.

O sistema proposto por Garver (1970) é bastante difundido na literatura, possui 6 barras, 6 circuitos existentes na topologia base, 15 caminhos candidatos à expansão e uma demanda prevista para o horizonte de planejamento de 760 MW, totalizando 4^{15} combinações possíveis de análise de investimento para a resolução do planejamento da expansão. Embora haja possibilidade de análise deste sistema através da consideração ou não do redespacho das unidades geradoras, nesta tese, a análise deste sistema considera o redespacho da geração.

Tanto o sistema IEEE24G0 quanto o SUL-CR foram apresentados detalhadamente na seção anterior, com a descrição da topologia base e dos reforços candidatos à expansão. Portanto, os parâmetros otimizados da HCDN e o custo de investimento obtidos pela heurística proposta, para o plano de expansão do sistema de transmissão, estão dispostos na Tabela 16.

Tabela 16 – Custo de investimento obtido pela HCDN e seus parâmetros otimizados para os sistemas que considera perdas ativas.

Sistema Garver com redespacho (GARVER-CR)				
Sistemas de Transmissão	Custo ótimo HCDN	PNL	A^{1*}	A^{2*}
GARVER-CR	M\$ 130	347	1	1
Sistema IEEE24 cenário G0 (IEEE24G0)				
Sistemas de Transmissão	Custo ótimo HCDN	PNL	A^{1*}	A^{2*}
IEEE24G0	M\$ 202	415	1	0,1-0,9
Sistema Sul Brasileiro com redespacho (SUL-CR)				
Sistemas de Transmissão	Custo ótimo HCDN	PNL	A^{1*}	A^{2*}
SUL-CR	M\$ 75,89	575	4	4

Fonte: Próprio autor.

A fim de avaliar a qualidade das soluções determinadas pela HCDN e confrontando-os com os resultados recentes divulgados na literatura (OLIVEIRA et al., 2018), na Tabela 17 é apresentado para cada sistema o valor referente ao custo de investimento obtido pela heurística proposta e o valor encontrado na literatura, considerando as perdas ativas inerentes aos sistemas de transmissão de energia elétrica. Por fim, é definida a variação econômica do custo propiciado pela HCDN em relação ao valor divulgado na literatura.

Tabela 17 – Comparação do custo de investimento obtido da HCDN para os sistemas considerando perdas ativas.

Sistemas de transmissão	Custo ótimo (OLIVEIRA et al., 2018)	Custo ótimo HCDN	Variação do custo (%)
GARVER-CR	M\$ 130	M\$ 130	0
IEEE24G0	M\$ 188	M\$ 202	+7,5%
SUL-CR	M\$ 89,18	M\$ 75,89	-14,9%

Fonte: Próprio autor.

A partir da Tabela 17, pode-se destacar o resultado obtido para o sistema SUL-CR, em que a heurística proposta possibilitou a obtenção de um plano de expansão, cujo custo de investimento é mais econômico que o divulgado pela literatura; tal economia resulta em uma redução de 14,9%. Entretanto, como não se tem garantia da otimalidade das soluções encontradas, dado que se trata de uma metodologia heurística construtiva, para o sistema IEEE24G0 não foi possível a obtenção da solução ótima divulgada na literatura. Para este sistema, o resultado foi um custo 7,5% superior ao valor referente à melhor solução conhecida até o momento, devido à divergência na seleção de um circuito pela HCDN quando comparado ao resultado do divulgado na literatura.

Com o propósito de detalhar os reforços adicionados pela HCDN em cada sistema, a Tabela 18 apresenta o caminho selecionado para a expansão e a quantidade de circuitos a serem construídos, identificando o plano de expansão mais econômico que o divulgado na literatura para o sistema SUL-CR e o plano de expansão do sistema GARVER-CR que teve o mesmo resultado que o encontrado na literatura.

Tabela 18 – Planejamento da expansão obtido pela HCDN para os sistemas de transmissão Garver e Sul Brasileiro com redespacho, considerando perdas ativas.

Sistema GARVER com redespacho (GARVER-CR)			
Caminho selecionado	Número de circuito	Caminho selecionado	Número de circuito
02-03	1	04-06	3
03-05	1	Custo total:	M\$ 130

Sistema Sul Brasileiro com redespacho (SUL-CR)			
Caminho selecionado	Número de circuito	Caminho selecionado	Número de circuito
05-06	2	20-21	2
05-06	2	20-23	1
46-06	1	-	-
42-43	1	Custo total:	M\$ 75,89

Fonte: Próprio autor.

4.4 COMPARAÇÕES COM RESULTADOS ENCONTRADOS POR HEURÍSTICAS CONSTRUTIVAS

Diante dos estudos apresentados para os sistemas da transmissão abordados anteriormente, nesta seção, é realizada uma comparação entre os resultados encontrados na literatura especializada, que fazem uso de algoritmos heurísticos construtivos, e os resultados alcançados pela estratégia heurística construtiva proposta para os sistemas que não consideram as perdas ativas, como é mostrado na Tabela 19. Os resultados (custos de investimento de expansão do sistema de transmissão) destacados são referentes às melhores soluções divulgadas na literatura.

Tabela 19 – Custo de investimento obtido por técnicas heurísticas construtivas.

Referência	Custo de investimento (M\$)				
	SUL-CR	SUL-SR	IEEE24G1	IEEE24G3	COL-P3
Villasana et al. (1985)	95,79	172,88	-	-	-
Monticelli et al. (1982)	143,33	186,06	-	-	-
Pereira e Pinto (1985)	102,31	178,90	-	-	-
Romero e Rocha (1999)	95,79	173,33	-	-	-
Romero e Rocha (1999)	70,28	164,51	-	-	-
Oliveira et al. (2005)	70,28	154,42	-	-	-
Romero et al. (2005)	-	-	438	218	-
Rider Flores (2006)	102,82	183,56	-	-	739,99
HCDN	70,28	154,42	370	218	647,88

Fonte: Próprio autor.

Confrontando os resultados, pode-se observar que a estratégia heurística apresentada proporcionou uma maior assertividade/eficiência no que diz respeito à qualidade das soluções finais encontradas, sendo obtido resultado melhor que o

de outras técnicas heurísticas construtivas para o sistema IEEE24G1 e COL-P3 e resultado igual para os sistemas Sul Brasileiro (com e sem redespacho) e IEEE24G3.

4.5 ANÁLISE DE DESEMPENHO DA HCDN

A partir da investigação da HCDN, por meio de treze sistemas com características distintas, verifica-se que os planos de expansão dos sistemas de transmissão, obtidos pelo método proposto, resultaram em custos de investimento atrativos. A Tabela 20 apresenta um comparativo entre o menor custo de investimento que foi divulgado na literatura, até o momento, e o menor custo obtido pela HCDN para a expansão do respectivo sistema de transmissão. Para o custo de investimento, determinado pela heurística construtiva, menor ou idêntico ao da literatura, é identificado o estágio da HCDN em que foi obtido.

Tabela 20 – Obtenção do menor custo de investimento para os sistemas de transmissão.

Sistema de transmissão	Literatura	Heurística construtiva proposta	
		Estágio 1 (A^{1*})	Estágio 2 (A^{2*})
Sem considerar os efeitos das perdas ativas da transmissão			
IEEE24G0	✓	-	✓
IEEE24G1	-	-	✓
IEEE24G2	✓	✓	✓
IEEE24G3	✓	✓	✓
IEEE24G4	-	-	✓
SUL-SR	✓	✓	✓
SUL-CR	✓	✓	✓
COL-P1	-	-	✓
COL-P2	✓	-	✓
COL-P3	✓	-	-
Considerando os efeitos das perdas ativas da transmissão			
GARVER-CR	✓	✓	✓
IEEE24G0	✓	-	-
SUL-CR	-	✓	✓

Fonte: Próprio autor.

Mediante a análise da Tabela 20, de todos os sistemas estudados, observa-se que a HCDN proporcionou a 84,6% dos sistemas analisados o custo de investimento

da expansão menor ou idêntico ao encontrado na literatura. A HCDN possibilitou planos de expansão mais econômico para 36,36% destes sistemas, ou seja, os custos de investimento dos planos definidos foram inferiores aos divulgados na literatura. Para os demais sistemas, que representa 63,64%, a heurística proposta determinou os mesmos planos de expansão e, conseqüentemente, os mesmos custos de investimento difundido na literatura. Por fim, nota-se que para apenas dois dos sistemas estudados não houve eficácia da HCDN em obter os custos ótimos de investimento.

Perante o desempenho da HCDN, identifica-se que dos sistemas que tiveram os custos de investimento reduzidos, quando comparados com a literatura, 75% destes planos ótimos de expansão foram definidos no Estágio 2 (A^{2*}) e, apenas, o sistema SUL-CR, com consideração dos efeitos das perdas ativas, teve seu plano ótimo de expansão determinado no Estágio 1 da heurística proposta.

Dessa forma, a relevância do Estágio 2 para a Heurística proposta é evidenciada através: (i) da redução dos custos de investimento de alguns dos sistemas estudados, quando comparados com a literatura, e; (ii) da obtenção dos valores ótimos dos custos de investimento idênticos aos que estão divulgados na literatura, com base em dois dos sete sistemas que tiveram custos idênticos, para os outros sistemas os custos ótimos foram obtidos no Estágio 1.

4.6 CONCLUSÕES PARCIAIS

A natureza combinatória do PET associada à sua modelagem torna-o um problema complexo, cuja características e dimensão do sistema de transmissão a ser analisado agrava ainda mais sua complexidade, de modo a requerer técnicas robustas para solucioná-lo. Dessa forma, a investigação de técnicas que visam sua resolução é objeto de pesquisas que demanda empenho de grupos e indústrias de energia, tendo como propósito realizar a expansão de sistemas de transmissão de energia elétrica através do menor custo de investimento.

Com base nas diferenças dos sistemas adotados para o estudo da aplicação da HCDN, que estão associadas à dimensão e às situações de operação quanto à possibilidade de consideração de redespacho e de perdas ativas no planejamento, e

nos resultados obtidos, a metodologia heurística construtiva proposta mostrou-se eficiente, propiciando a resolução de diversos sistemas a partir da determinação de soluções de excelente qualidade e com um número reduzido de execuções de PNLs pela metodologia primal-dual de pontos interiores. De acordo com o desempenho da HCDN, é evidenciada a importância da definição da estratégia de busca em estágios na obtenção dos planos de expansão mais econômicos do que os divulgados na literatura especializada, como é o caso do plano final de expansão determinado para os sistemas sem considerar o redespacho e perdas ativas: IEEE24G1, IEEE24G4 e COL-P1; e para o sistema SUL-CR, que considera no planejamento da expansão o redespacho e as perdas ativas.

Portanto, relacionando a qualidade das soluções apresentadas e o esforço computacional da HCDN proposta, pode-se concluir que a ferramenta apresentada mostra-se interessante e de valiosa contribuição para resolução do problema do PET, pois a estratégia proposta é capaz de conciliar soluções finais de boa qualidade com baixo esforço computacional para sistemas de médio e grande porte, sendo esta uma das dificuldades encontradas pelas heurísticas construtivas existentes.

5 CONCLUSÃO

Diante da apresentação da HCDN e do desempenho apresentado pela técnica na obtenção do plano de expansão de sistemas de transmissão estudados, são apresentadas as conclusões do presente trabalho e as principais sugestões para trabalhos futuros.

5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

No presente trabalho foi proposto um novo algoritmo heurístico construtivo, a Heurística Construtiva em Dois Níveis, para lidar com variáveis inteiras inerentes ao problema do planejamento da expansão de sistemas de transmissão de energia. Para a implementação da heurística construtiva proposta, foram consideradas as seguintes características: (i) as variáveis de decisão inteiras foram relaxadas através da função de decisão de reforço (*DR*), modelada pela função tangente hiperbólica modificada, que apresenta variação na sua inclinação nos dois estágios do algoritmo; (ii) um indicador de desempenho inédito foi adotado; (iii) o método primal-dual de pontos interiores foi utilizado na resolução do problema de otimização não linear. Tais aspectos forneceram uma estratégia que se mostrou eficiente na obtenção do plano final de expansão de sistemas de transmissão.

A estratégia de busca possibilitou uma melhora na exploração da região de solução, dividida em duas etapas, no Estágio 1, ocorre a busca pela melhor solução por meio da análise de dez inclinações na função de decisão de reforço. Após a determinação da melhor solução, o Estágio 2 é iniciado e então é realizada a busca em torno da melhor solução encontrada, mediante a análise de distintas em torno da inclinação correspondente à solução do estágio anterior. Esta busca estabelece um refinamento da solução, que, combinado com o indicador de desempenho, propiciou a obtenção de planos de expansão mais econômicos do que os divulgados na literatura.

A heurística construtiva proposta mostrou-se capaz de construir soluções competitivas, sendo o estágio de refinamento fundamental para obtenção de soluções não divulgadas pela literatura especializada. Destaca-se também que a heurística proposta possibilitou a obtenção de soluções fornecidas, até então, apenas por

métodos matemáticos (RIDER et al., 2008) e metaheurísticos (OLIVEIRA et al., 2018), porém, através de um número menor de execuções de problemas de programação não linear.

Baseado na investigação do desempenho da heurística proposta, nota-se que duas importantes premissas requisitadas pela maioria das metodologias aplicadas ao problema em questão são atendidas, sendo: a boa qualidade das soluções obtidas e o baixo esforço computacional. Portanto, a estratégia heurística proposta traz uma contribuição interessante para a comunidade científica e a indústria de energia, embora a solução obtida seja viável, como em toda utilização de técnicas heurísticas na otimização, não há garantia da sua otimalidade.

5.2 TRABALHOS FUTUROS

Devido às características da HCDN, a seguir, são destacadas as principais sugestões de temas para desenvolvimento de trabalhos futuros que objetivam dar continuidade à pesquisa sobre o referido trabalho. Tais sugestões quanto ao uso da HCDN são:

- Incorporação de restrições de segurança no planejamento de expansão de sistemas de transmissão de energia elétrica;
- Investigação de novos índices de desempenho na etapa de construção da heurística proposta;
- Utilização da técnica para construir soluções iniciais de boa qualidade para métodos baseados em inteligência computacional/metaheurística;
- Utilização da técnica como ferramenta de análise visando à redução do número de reforços candidatos à expansão (redução do espaço de busca);
- Aplicação da técnica como um identificador de limites em algoritmos de ramificação (*Branch-and-Bound*);
- Utilização da técnica na abordagem do problema dinâmico da expansão de sistemas de transmissão de energia elétrica;

- Aplicação da técnica ao problema do planejamento da expansão de sistemas de transmissão utilizando o modelo do fluxo de potência não linear.

REFERÊNCIAS

- AKBARI, T.; BINA, M. T. A linearized formulation of AC multi-year transmission expansion planning: A mixed-integer linear programming approach. **Electric Power Systems Research**, Elsevier BV, v. 114, p. 93–100, sep 2014.
- ALVAREZ, R.; RAHMANN, C.; PALMA-BEHNKE, R.; ESTÉVEZ, P. A novel meta-heuristic model for the multi-year transmission network expansion planning. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, Elsevier BV, v. 107, p. 523–537, may 2019.
- ARABPOUR, A.; BESMI, M. R.; MAGHOULI, P. Transmission expansion and reactive power planning considering wind energy investment using a linearized AC model. **Journal of Electrical Engineering & Technology**, Springer Science and Business Media LLC, v. 14, n. 3, p. 1035–1043, jan 2019.
- BAHARVANDI, A.; AGHAEI, J.; NIKNAM, T.; SHAFIE-KHAH, M.; GODINA, R.; CATALAO, J. P. S. Bundled generation and transmission planning under demand and wind generation uncertainty based on a combination of robust and stochastic optimization. **IEEE Transactions on Sustainable Energy**, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 9, n. 3, p. 1477–1486, jul 2018.
- DOMÍNGUEZ, A. H.; ESCOBAR, A. H.; GALLEGO, R. A. An MILP model for the static transmission expansion planning problem including HVAC/HVDC links, security constraints and power losses with a reduced search space. **Electric Power Systems Research**, Elsevier BV, v. 143, p. 611–623, feb 2017.
- ESMAILI, M.; GHAMSARI-YAZDEL, M.; AMJADY, N.; CHUNG, C. Y.; CONEJO, A. J. Transmission expansion planning including TCSCs and SFCLs: A MINLP approach. **IEEE Transactions on Power Systems**, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 35, n. 6, p. 4396–4407, nov 2020.
- FLÁVIO, S. A. **Planejamento da expansão de Sistemas de Transmissão com elevada participação de Fontes Renováveis**. 2015. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Itajubá, 2015.
- FREITAS, P. F.; MACEDO, L. H.; ROMERO, R. A strategy for transmission network expansion planning considering multiple generation scenarios. **Electric Power Systems Research**, Elsevier BV, v. 172, p. 22–31, jul 2019. ISSN 0378-7796. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378779619300823>>.

GALLEGO, L. A.; GARCÉS, L. P.; RAHMANI, M.; ROMERO, R. A. High-performance hybrid genetic algorithm to solve transmission network expansion planning. **IET Generation, Transmission & Distribution**, Institution of Engineering and Technology (IET), v. 11, n. 5, p. 1111–1118, mar 2017. ISSN 1751-8695.

GAN, W.; AI, X.; FANG, J.; YAN, M.; YAO, W.; ZUO, W.; WEN, J. Security constrained co-planning of transmission expansion and energy storage. **Applied Energy**, Elsevier BV, v. 239, p. 383–394, apr 2019.

GARVER, L. Transmission network estimation using linear programming. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), PAS-89, n. 7, p. 1688–1697, sep 1970. ISSN 0018-9510. Disponível em: <<https://doi.org/10.1109/TPAS.1970.292825>>.

GOMES, P. V.; SARAIVA, J. T. Static transmission expansion planning using heuristic and metaheuristic techniques. In: **2015 IEEE Eindhoven PowerTech**. [S.l.]: IEEE, 2015. p. 1–6.

GOMES, P. V.; SARAIVA, J. T. Evaluation of the performance of space reduction technique using AC and DC models in transmission expansion problems. In: **2016 13th International Conference on the European Energy Market (EEM)**. [S.l.]: IEEE, 2016. p. 1–5. ISSN 2165-4093.

GOMES, P. V.; SARAIVA, J. T. State-of-the-art of transmission expansion planning: A survey from restructuring to renewable and distributed electricity markets. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, Elsevier BV, v. 111, p. 411–424, oct 2019. ISSN 0142-0615. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S014206151831888X>>.

GOMES, P. V.; SARAIVA, J. T. A two-stage strategy for security-constrained AC dynamic transmission expansion planning. **Electric Power Systems Research**, Elsevier BV, v. 180, p. 106167, mar 2020.

HEMMATI, R.; HOOSHMAND, R.-A.; KHODABAKHSHIAN, A. Coordinated generation and transmission expansion planning in deregulated electricity market considering wind farms. **Renewable Energy**, Elsevier BV, v. 85, p. 620–630, jan 2016.

LATORRE, G.; CRUZ, R.; AREIZA, J.; VILLEGAS, A. Classification of publications and models on transmission expansion planning. **IEEE Transactions on Power Systems**, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 18, n. 2, p. 938–946, may 2003. ISSN 1558-0679. Disponível em: <<https://doi.org/10.1109/TPWRS.2003.811168>>.

LUMBRERAS, S.; RAMOS, A.; BANEZ-CHICHARRO, F. Optimal transmission network expansion planning in real-sized power systems with high renewable penetration. **Electric Power Systems Research**, Elsevier BV, v. 149, p. 76–88, aug 2017.

MENDONÇA, I. M. de; JUNIOR, I. C. S.; DIAS, B. H.; MARCATO, A. L. Identification of relevant routes for static expansion planning of electric power transmission systems. **Electric Power Systems Research**, Elsevier BV, v. 140, p. 769–775, nov 2016. ISSN 0378-7796. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378779616301638>>.

MÍNGUEZ, R.; GARCÍA-BERTRAND, R. Robust transmission network expansion planning in energy systems: Improving computational performance. **European Journal of Operational Research**, Elsevier BV, v. 248, n. 1, p. 21–32, jan 2016.

MONTICELLI, A.; SANTOS, A.; PEREIRA, M. V. F.; CUNHA, S. H.; PARKER, B. J.; PRACA, J. C. G. Interactive transmission network planning using a least-effort criterion. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), PAS-101, n. 10, p. 3919–3925, oct 1982. ISSN 0018-9510.

MORTAZ, E.; FUERTE-LEDEZMA, L. F.; GUTIÉRREZ-ALCARAZ, G.; VALENZUELA, J. Transmission expansion planning using multivariate interpolation. **Electric Power Systems Research**, Elsevier BV, v. 126, p. 87–99, sep 2015.

NEMATI, H.; LATIFY, M. A.; YOUSEFI, G. R. Coordinated generation and transmission expansion planning for a power system under physical deliberate attacks. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, Elsevier BV, v. 96, p. 208–221, mar 2018.

OLIVEIRA, E. de; SILVA, I. da; PEREIRA, J.; CARNEIRO, S. Transmission system expansion planning using a sigmoid function to handle integer investment variables. **IEEE Transactions on Power Systems**, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 20, n. 3, p. 1616–1621, aug 2005. ISSN 1558-0679.

OLIVEIRA, E. J. D.; MORAES, C. A.; OLIVEIRA, L. W.; HONÓRIO, L. M.; POUBEL, R. P. B. Efficient hybrid algorithm for transmission expansion planning. **Electrical Engineering**, Springer Science and Business Media LLC, v. 100, n. 4, p. 2765–2777, oct 2018.

PARKER, B. J.; TANABE, A.; SCHILLING, M. T. **Precisão do Modelo Linearizado de Fluxo de Potência para Simulação do Sistema Elétrico Brasileiro**. [S.l.], 1980.

PEREIRA, M.; PINTO, L. Application of sensitivity analysis of load supplying capability to interactive transmission expansion planning. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), PAS-104, n. 2, p. 381–389, feb 1985. ISSN 0018-9510.

PLOUSSARD, Q.; OLMOS, L.; RAMOS, A. A search space reduction method for transmission expansion planning using an iterative refinement of the DC load flow model. **IEEE Transactions on Power Systems**, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 35, n. 1, p. 152–162, jan 2020.

Rider Flores, M. J. **Planejamento da Expansão de Sistemas de Transmissão Usando os Modelos CC - CA e Técnicas de Programação Não - Linear**. 2006. Tese (phdthesis) — Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, 2006.

RIDER, M.; GARCIA, A.; ROMERO, R. Transmission system expansion planning by a branch-and-bound algorithm. **IET Generation, Transmission & Distribution**, Institution of Engineering and Technology (IET), v. 2, n. 1, p. 90, January 2008. ISSN 1751-8695.

ROLDÁN, C.; NIETA, A. S. de la; GARCÍA-BERTRAND, R.; MÍNGUEZ, R. Robust dynamic transmission and renewable generation expansion planning: Walking towards sustainable systems. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, Elsevier BV, v. 96, p. 52–63, mar 2018.

ROMERO, R.; MONTICELLI, A.; GARCIA, A.; HAFFNER, S. Test systems and mathematical models for transmission network expansion planning. **IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution**, Institution of Engineering and Technology (IET), v. 149, n. 1, p. 27, Jan 2002. ISSN 1350-2360.

ROMERO, R.; ROCHA, C. Planificação de sistemas de transmissão usando um algoritmo heurístico construtivo. In: **Anales del XIII Congreso Chileno de Ingenieria Electrica**. [S.l.: s.n.], 1999. p. 493–498.

ROMERO, R.; ROCHA, C.; MANTOVANI, J.; SANCHEZ, I. Constructive heuristic algorithm for the DC model in network transmission expansion planning. **IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution**, Institution of Engineering and Technology (IET), v. 152, n. 2, p. 277, March 2005. ISSN 1350-2360.

ROUHANI, A.; HOSSEINI, S. H.; RAOOFAT, M. Composite generation and transmission expansion planning considering distributed generation. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, Elsevier BV, v. 62, p. 792–805, nov 2014.

Silva Junior, I. C. **Planejamento Estático da Expansão de Sistema de Transmissão utilizando um novo Algoritmo Heurístico Construtivo**. 2003. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Juiz de Fora, 2003.

SOUSA, A. S.; ASADA, E. N. Long-term transmission system expansion planning with multi-objective evolutionary algorithm. **Electric Power Systems Research**, Elsevier BV, v. 119, p. 149–156, feb 2015.

VERMA, S.; MUKHERJEE, V. Investigation of static transmission expansion planning using the symbiotic organisms search algorithm. **Engineering Optimization**, Informa UK Limited, v. 50, n. 9, p. 1544–1560, dec 2017.

VILLASANA, R.; GARVER, L.; SALON, S. Transmission network planning using linear programming. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), PAS-104, n. 2, p. 349–356, feb 1985. ISSN 0018-9510.

WU, Y.-C.; DEBS, A.; MARSTEN, R. A direct nonlinear predictor-corrector primal-dual interior point algorithm for optimal power flows. **IEEE Transactions on Power Systems**, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 9, n. 2, p. 876–883, may 1994. ISSN 1558-0679. Disponível em: <<https://doi.org/10.1109/59.317660>>.

WU, Z.; DU, X.; GU, W.; ZHANG, X.-P.; LI, J. Automatic selection method for candidate lines in transmission expansion planning. **IEEE Access**, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 6, p. 11605–11613, 2018.

YUAN, Z.; WANG, W.; WANG, H.; GHADIMI, N. Probabilistic decomposition-based security constrained transmission expansion planning incorporating distributed series reactor. **IET Generation, Transmission & Distribution**, Institution of Engineering and Technology (IET), v. 14, n. 17, p. 3478–3487, sep 2020.

ZAMBRANO, C.; ARANGO-ARAMBURO, S.; OLAYA, Y. Dynamics of power-transmission capacity expansion under regulated remuneration. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, Elsevier BV, v. 104, p. 924–932, jan 2019.

ZHAN, J.; CHUNG, C. Y.; ZARE, A. A fast solution method for stochastic transmission expansion planning. **IEEE Transactions on Power Systems**, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 32, n. 6, p. 4684–4695, nov 2017.

ZHANG, H.; CHENG, H.; LIU, L.; ZHANG, S.; ZHOU, Q.; JIANG, L. Coordination of generation, transmission and reactive power sources expansion planning with high penetration of wind power. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, Elsevier BV, v. 108, p. 191–203, jun 2019.

ZHANG, X.; CONEJO, A. J. Candidate line selection for transmission expansion planning considering long- and short-term uncertainty. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, Elsevier BV, v. 100, p. 320–330, sep 2018.